

Michel Biron

Aide-mémoire

Transformation des matières plastiques

L'USINENOUVELLE

DUNOD

CHEZ LE MÊME ÉDITEUR

Claude Bathias *et coll.*, *Matériaux composites*, 2^e édition
Marc Carrega *et coll.*, *Matériaux polymères*, 2^e édition
Marc Carrega, *Aide-mémoire des matières plastiques*, 2^e édition
Jean-François Pichon, *Aide-mémoire
d'injection des matières plastiques*, 2^e édition

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du

Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, Paris, 2010

ISBN 978-2-10-055301-3

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^o et 3^o a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos	1
--------------	---

A

Créer un contexte favorable à la transformation

1 • Choix stratégiques	5
1.1 Principe général de la transformation	5
1.2 Quelques principes généraux de conception pour faciliter la transformation	10
1.3 Choisir les grades adéquats	15
1.4 Éléments comparatifs sur les principaux procédés	18
2 • Opérations en amont et aval	29
2.1 Préparer les résines	30
2.2 Optimiser l'état final des polymères : recuits, durcissement et réticulation	64

B

Procédés de transformation

3 • Moulage par injection des thermoplastiques	75
3.1 Principe	75
3.2 Les systèmes d'injection	77

3.3	Les moules et systèmes de fermeture	90
3.4	Les presses à injection	100
3.5	Aides à la conduite des presses	109
3.6	Procédés spéciaux d'injection	120
3.7	Presses hydrauliques, électriques ou hybrides ?	130
4	• Extrusion des thermoplastiques	133
4.1	Principe	133
4.2	Les vis pour extrudeuses monovis	136
4.3	Les dispositifs complémentaires des vis	138
4.4	Têtes, filières et poinçons	139
4.5	Les problèmes thermiques et rhéologiques	141
4.6	Exemples d'extrudeuses monovis	147
4.7	Les extrudeuses bivirus	151
4.8	Coextrusion	155
4.9	Choix de l'extrudeuse	157
4.10	Les lignes d'extrusion	159
4.11	Exemples de constructeurs et distributeurs de matériel d'extrusion	176
4.12	Indications sur la conception et le coût des profilés	177
4.13	Systèmes d'aide à la conduite des extrudeuses et lignes d'extrusion	179
5	• Injection soufflage et extrusion soufflage des thermoplastiques	183
5.1	Principe du soufflage	184
5.2	Les divers types de souffleuses	185
5.3	Les thermoplastiques transformables par soufflage	190
5.4	Les lignes de soufflage	191
5.5	Le soufflage séquentiel 3D pour tubulures convolutées	193
5.6	Systèmes d'aide à la conduite des lignes de soufflage	193
5.7	Les applications du soufflage	196
5.8	Exemples de constructeurs et distributeurs de matériel	196

6 • Autres procédés de première transformation des polymères solides	199
6.1 Moulage par compression	199
6.2 Moulage par compression-transfert	202
6.3 Les presses	205
6.4 Injection des thermodurcissables	212
6.5 Rotomoulage, <i>slush moulding</i>	215
6.6 Calandrage	218
7 • Transformation des composites	225
7.1 Moulage par compression	228
7.2 Moulage au contact	230
7.3 Méthodes par écoulement de résines liquides : coulée, RTM, RIM, infusion	234
7.4 Drapage	237
7.5 Stratification continue de plaques ou feuilles ondulées ou nervurées	238
7.6 Moulage par centrifugation	239
7.7 Enroulement filamentaire	240
7.8 Pultrusion	241
7.9 <i>Pullwinding, overbraiding</i>	243
7.10 Construction sandwich, panneaux sandwichs	244
7.11 Les préimprégnés thermoplastiques en feuilles ou thermoplastiques renforcés estampables	247
8 • Matériaux alvéolaires : mousses, expansés, allégés	251
8.1 Moulage des polystyrènes et polypropylènes expansibles : PSE ou EPS et EPP	252
8.2 Moussage des polyuréthanes	253
8.3 Alvéolaires et allégés par voie chimique à l'aide d'agents gonflants	254
8.4 Moussage par voie physique à l'aide de gaz occlus	255

8.5	Création d'alvéoles par dissolution de sels minéraux : éponges cellulósiques	257
8.6	Mousses syntactiques	257
9	• Autres procédés : e-manufacturing, transformation des liquides	259
9.1	Prototypage rapide et e-manufacturing ou fabrication directe	259
9.2	Poudrage	264
9.3	Injection de poudres métalliques et céramiques : IMM, MIM, CIM, PIM...	265
9.4	Transformation en phase liquide	266
10	• Procédés de seconde transformation et de finition	271
10.1	Thermoformage	271
10.2	Usinage	276
10.3	Assemblage	277
10.4	Chaudronnage, confection	285
10.5	Finition, décoration, impression, réticulation, protection...	286
10.6	Réparation	287

C

Éléments prospectifs

11	• Tendances	291
11.1	Évolution du contexte général	292
11.2	Grands axes d'évolution des procédés de transformation	298
11.3	Dix exemples illustrant quelques-unes des nouvelles tendances	299
	Abréviations des polymères	303
	Bibliographie	307
	Index alphabétique	309

AVANT-PROPOS

L'utilisation des matières plastiques se développe régulièrement à un rythme soutenu, supérieur à celui de l'industrie, en investissant de nombreux domaines jusqu'alors fiefs de matériaux traditionnels tels que les métaux, le verre, le bois, etc. Les acteurs de cette mutation viennent d'horizons très divers avec une vaste culture de l'ingénierie des matériaux métalliques mais, en général, peu habitués aux matériaux organiques macromoléculaires. Les propriétés physiques, mécaniques et chimiques spécifiques aux matières plastiques conduisent à des principes de conception et à des méthodes de mise en œuvre particulières. De plus, les matières plastiques recouvrent un vaste panel de matériaux, depuis des films grand public fins et souples mais relativement fragiles, jusqu'aux composites en fibres de carbone soigneusement ordonnées dans des matrices à hautes performances pour produire des composites exceptionnellement résistants mais onéreux.

Le but de cet aide-mémoire est de contribuer à l'information des non-spécialistes, transformateurs, concepteurs et utilisateurs de pièces plastiques sur les immenses possibilités de la transformation des matières plastiques, étape primordiale pour la qualité et le coût des pièces.

Les implications de la transformation sont à la fois techniques, économiques, commerciales et environnementales. La mise en œuvre ne peut donc pas être isolée du contexte général concernant les propriétés finales désirées, la rhéologie du grade choisi, la géométrie de la pièce, l'importance des séries à fabriquer depuis l'unité jusqu'aux cadences élevées de l'électroménager ou de l'automobile.

Le prix de revient et le délai de mise sur le marché dépendent également du procédé choisi et des machines disponibles.

Après des rappels sur la nécessité de créer un contexte favorable à la transformation en appliquant les principes généraux de conception destinés à faciliter

la transformation sont examinés des éléments comparatifs, techniques et économiques sur les principaux procédés afin d'aider le lecteur à sélectionner les pistes potentiellement intéressantes pour son cas particulier. Le succès industriel de la transformation passe par une préparation soignée de la mise en œuvre et, éventuellement, par des opérations subséquentes optimisant les propriétés des pièces et produits finis.

Le cœur de l'ouvrage dresse de façon synthétique un panel clair et complet des méthodes envisageables pour apporter avec concision des premiers éléments de réponse à l'étude et au choix des méthodes de production.

Pour conclure sont examinées les grandes tendances qui régissent les orientations actuelles et futures des méthodes de transformation pour tenir compte des contraintes économiques universelles et des contraintes environnementales émergentes. Les principaux points concernent les économies d'énergie, la facilité d'utilisation et la fiabilité des procédés, la réduction des coûts, l'automatisation, l'intégration des étapes de production, la réduction des poids des pièces, la stratégie de traitement des déchets.

L'évolution des procédés est continue avec de nouvelles méthodes totalement innovantes mais aussi avec l'adaptation de méthodes connues à des secteurs de fabrication qui semblaient réservés à des procédés bien établis et indéracinables.

Cet ouvrage d'information et d'aide à la décision est destiné aux concepteurs, utilisateurs et designers de pièces plastiques. Il s'adresse aux ingénieurs et techniciens ainsi qu'à un public intéressé par les possibilités des matières plastiques.

A

Créer un contexte
favorable
à la transformation

1 • CHOIX STRATÉGIQUES

A

CRÉER UN CONTEXTE FAVORABLE À LA TRANSFORMATION

1.1 Principe général de la transformation

Le but de la transformation est, dans des conditions techniques, économiques et écologiques satisfaisantes, de :

- donner la forme et l'aspect voulus au polymère pour obtenir la pièce ou le demi-produit à fabriquer ;
- conserver formes et aspects jusqu'à la mise en service (et après) ;
- amener les propriétés physiques, mécaniques, sensorielles au stade voulu.

Les polymères de départ peuvent avoir :

- des formes physiques très variées, depuis des liquides fluides jusqu'à des solides de grandes dimensions ;
- des états chimiques différents : monomères, oligomères, polymères thermoplastiques ou thermodurcissables. Dans ce dernier cas le durcissement ou la réticulation constitue une étape supplémentaire intervenant obligatoirement lorsque la mise en forme est effective. Certains polymères utilisés couramment à l'état thermoplastique peuvent être éventuellement réticulés, comme le polyéthylène, ce qui améliore ses propriétés mécaniques et chimiques. D'autres familles de polymères telles que les polyuréthanes existent sous des formes thermodurcissables, la plus courante dans ce cas, et sous la forme thermoplastique, TPU. Les procédés de transformation et les caractéristiques finales sont alors différents.

La transformation peut également incorporer des matériaux étrangers :

- autre matière plastique : co-moulage, surmoulage ;
- inserts, feuilles de contrecollage ;
- renforts et mousses pour les composites.

Le procédé doit alors respecter des matériaux d'apport aussi divers que :

- d'autres plastiques et élastomères ;
- des métaux ;
- des papiers et cartons ;
- des textiles ;
- du verre ;
- des matériaux naturels comme le bois ou le cuir...

Suivant les cas, on sera amené à choisir entre un certain nombre de procédés, toutes les méthodes ne pouvant pas s'appliquer à un cas déterminé.

Les figures 1.1 et 1.2 présentent un certain nombre de solutions sans prétention d'exhaustivité.

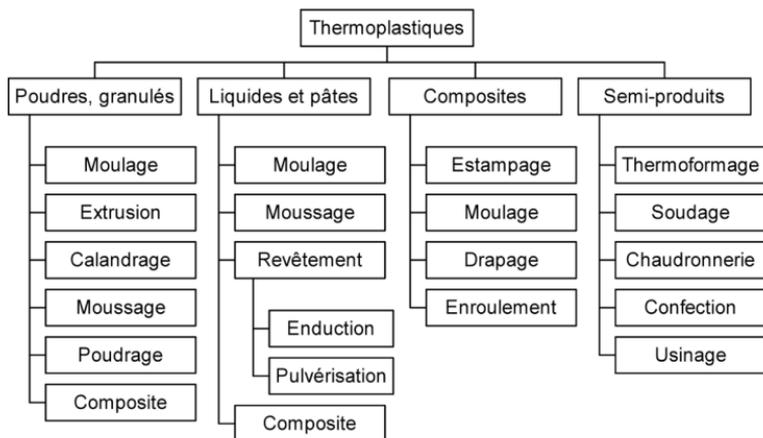


Figure 1.1 – Thermoplastiques : exemples de procédés.

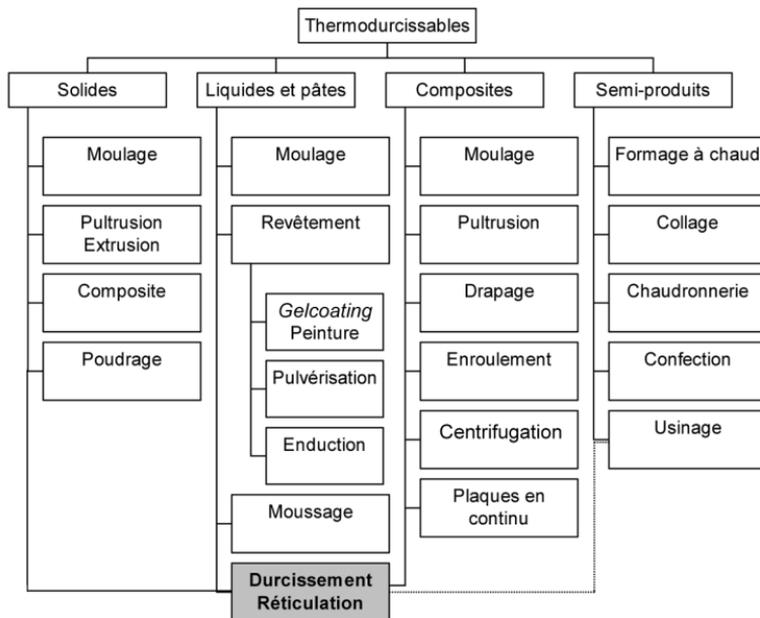


Figure 1.2 – Thermodurcissables : exemples de procédés.

Le principe général de la transformation implique plusieurs phases plus ou moins imbriquées intervenant dans un ordre variable avec, dans sa version la plus complète :

- homogénéisation des produits : polymère(s), ingrédients, gaz dans le cas du moussage ;
- transport et fluidification des matériaux ;
- incorporation des renforts ou autres matériaux d'apport ;
- cohésion des particules élémentaires par la combinaison de température et de pression, éventuellement par séchage, réticulation... ;
- moussage éventuel ;
- mise à la forme dans des conditions homogènes de température et de pression ;
- consolidation du matériau par refroidissement ou réticulation ;
- finition.

Les trois paramètres majeurs de la transformation sont la température, les contraintes et le temps. Évidemment, ils agissent les uns sur les autres en provoquant une amplification de leurs actions.

La température conditionne principalement la viscosité, les dilatations et retraits, les contraintes résiduelles, la cristallinité, la réticulation. Elle est limitée en fonction de la thermodégradation du polymère et de sa réticulation éventuelle qui restreint l'aptitude à la mise en forme. La dégradation des matériaux de renfort ou d'apport, par exemple des textiles, du papier, du bois ou des dispositifs électroniques, peut imposer des contraintes supplémentaires. La température de transformation a également des conséquences sur les consommations d'énergie, le refroidissement et le coût final.

Le comportement thermique des polymères dépend de leur structure physico-chimique, notamment de leur caractère semi-cristallin ou amorphe, comme l'indique schématiquement la figure 1.3. La figure 1.4 et le tableau 1.1 montrent quelques exemples.

Les contraintes conditionnent principalement la rhéologie, le compactage de la matière, les contraintes résiduelles. Dans le cas de surmoulage, des contraintes trop élevées peuvent déplacer et/ou détériorer les dispositifs ou matériaux à surmouler.

Le temps conditionne le réchauffage et le refroidissement, la cristallisation, la rhéologie, les dilatations et retraits, le fluage, la dégradation de la plupart des matériaux. La durée de transformation a également des conséquences sur les cadences de production, les consommations d'énergie et le coût final.

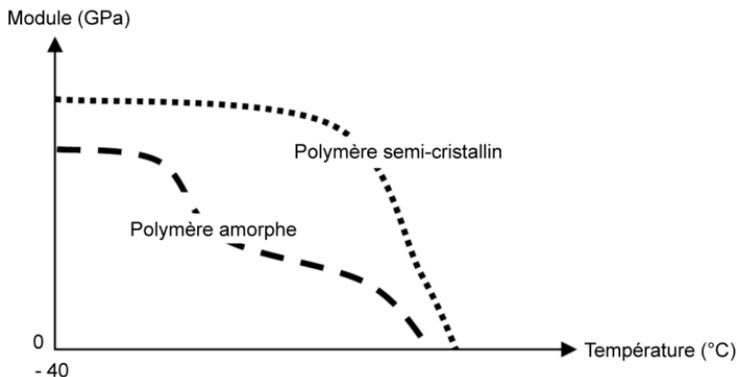


Figure 1.3 – Exemples d'évolution des modules en fonction de la température pour des polymères amorphe et semi-cristallin.

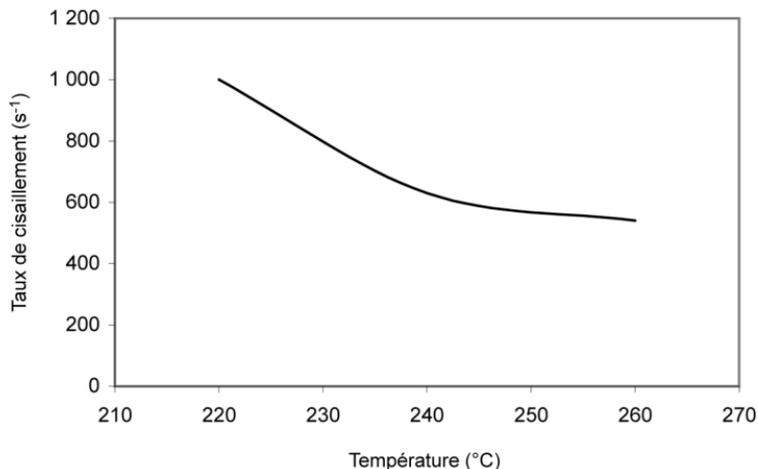


Figure 1.4 – Courbe d'iso-viscosité : taux de cisaillement en fonction de la température.

Tableau 1.1 – Exemples de viscosités d'un polymère en fonction de la température et du taux de cisaillement.

Température (°C)	Taux de cisaillement (s ⁻¹)	Viscosité (Pa.s)
220	1 000	190
240	1 000	170
260	1 000	152
240	100	410
240	1 000	170
240	10 000	44

Ce comportement rhéologique offre une certaine latitude de choix des conditions optimales. Par exemple, la figure 1.4 indique les couplages taux de cisaillement/température permettant d'obtenir la même viscosité pour des plages de 40 °C pour la température et de 460 s⁻¹ pour les taux de cisaillement.

Remarquons que, pour la mesure de l'aptitude à la mise en œuvre, il est nécessaire d'étudier la rhéologie du polymère dans les plages de températures et de taux de cisaillement qui seront réellement utilisées industriellement. L'indice de fluidité, par exemple, n'est pas représentatif du moulage par injection à cause des trop faibles taux de cisaillement. La rhéologie capillaire est dans ce cas bien mieux adaptée.

Finalement, la transformation dépend, entre autres :

- des propriétés du polymère : homogénéité, rhéologie, propriétés thermiques et dimensionnelles ;
- des caractéristiques des éventuels matériaux de renfort et d'apport ;
- des propriétés finales désirées ;
- des cadences de production ;
- des conditions économiques.

1.2 Quelques principes généraux de conception pour faciliter la transformation

Le choix du procédé de transformation doit résulter d'un consensus entre le concepteur de la pièce et le transformateur en fonction de la matière, du matériel, du coût acceptable et des conditions d'utilisation de la pièce. Les règles qui suivent sont obligatoirement générales et souffrent forcément de notables exceptions. Elles peuvent ou doivent être modifiées suivant les conditions particulières du cas concret à étudier.

Cependant, dans la plupart des situations, il est généralement souhaitable de :

- favoriser les écoulements ;
- éviter les stagnations de matière ;
- adapter les épaisseurs au procédé de transformation ;
- minimiser les variations d'épaisseur ;
- assurer la progressivité des variations de dimensions ;
- permettre le démoulage ou l'extrusion en évitant les outillages complexes et onéreux ;
- veiller à la stabilité dimensionnelle des produits transformés...

1.2.1 Facilité d'écoulement et stagnation de matière

L'équilibrage des flux, la symétrie des pièces et toutes mesures assurant l'isotropie des écoulements sont des facteurs favorables à l'absence de gauchissements et distorsions. En revanche, les cloisons, parois, nervures perpendiculaires au flux d'écoulement sont sources potentielles de perturbations et de stagnation de la matière.

La présence d'angles vifs, les pièges à matière sont également déconseillés pour les mêmes raisons. Des rayons de 0,3 à 0,5 mm à la place des angles vifs ont l'avantage supplémentaire de réduire les concentrations de contrainte et d'améliorer notablement la résistance structurelle.

Les inserts incorporés directement au moulage peuvent poser des problèmes d'écoulement en faisant obstacle au flux de matière et, en plus, surtout avec les plastiques non chargés, posent des problèmes de dilatation différentielle dus aux différences importantes des coefficients de dilatation du métal et du plastique.

1.2.2 Dimensions des pièces

Les **grandes dimensions** sont à éviter pour le moulage par injection pour des raisons de cotes des presses et outillages, risques de gauchissement, flambage, fragilité, fluage, etc. Dans la mesure du possible, il faut essayer de les morceler par des évidements, encoches...

Pour les grandes surfaces, on peut éventuellement étudier des raidisseurs.

Les **épaisseurs** doivent faire l'objet de réflexions particulières. Elles sont définies *a priori* par le concepteur en fonction des propriétés mécaniques initiales et à long terme corrigées d'un facteur de sécurité. Cependant, les polymères étant mauvais conducteurs de la chaleur et plus ou moins sensibles à l'anisotropie, le transformateur est soumis à des impératifs différents qui amèneront à un choix consensuel. Pour l'injection et l'extrusion des polymères fondus, procédés de transformation majoritaires, les épaisseurs les plus courantes sont de l'ordre de 0,7 à 3 mm, mais des conditions spéciales de mise en œuvre permettent d'élargir cette plage de 0,3 à 10 mm.

Les fortes épaisseurs entraînent :

- un prix de matière élevé ;
- une augmentation des temps de transfert thermique et des durées de cycle ;
- un retrait important avec risques de retassures, porosités, soufflures...

Un certain nombre de parades existent, par exemple l'adoption de grades renforcés ou l'utilisation de nervures de renfort si possible parallèles au sens d'écoulement. Elles doivent être de plus faible épaisseur que la paroi à renforcer, par exemple 0,3 à 0,6 fois l'épaisseur de cette paroi, et comporter des découpes pour atténuer le gauchissement si elles sont de longueur importante. Pour l'extrusion, les nervures de renforcement ne peuvent être que longitudinales et continues.

Les trop faibles épaisseurs provoquent :

- une solidification rapide du polymère qui risque d'empêcher l'écoulement de la matière sur de longs trajets ;
- des risques de fragilité.

Les variations d'épaisseurs dans une même pièce sont à éviter. Toutefois, si elles sont impératives, elles doivent être progressives : zone inclinée de pente 3 pour 1 ou congé de rayon important (5 mm par exemple) ou combinaison des deux techniques.

1.2.3 Précision des cotes

La précision des pièces et demi-produits dépend de la matière utilisée, de la précision de l'outillage et de tous les facteurs de mise en œuvre de la matière : traitements thermiques aux diverses étapes, pression d'injection ou d'extrusion, contraintes de démoulage et de passage dans les conformateurs, déformations au stockage...

Il ne faut donc prévoir des tolérances étroites que pour les cotes qui le nécessitent absolument, car le prix de revient augmente rapidement. À titre d'exemple, pour une matière et une pièce données, le coût peut passer de 100 pour des tolérances normales à 170 pour des tolérances serrées et à 300 pour des tolérances très serrées.

Les normes dimensionnelles sont nombreuses et disséminées dans les différentes rubriques pour chacun des systèmes de normalisation nationaux ou internationaux. Par exemple, elles peuvent se trouver classées dans :

- types de produits : pièces, tubes, tuyaux, canalisations, profilés, raccords moulés, réservoirs et récipients en PRV... ;
- applications ciblées : utilisation sous pression, distribution d'eau chaude et froide, aspiration et refoulement, distribution basse pression des liquides pétroliers, collecteurs d'assainissement sans pression enterrés, distribution de combustibles gazeux, transport des fluides ;

- types de polymères, par exemple : polyéthylène (PE), polyéthylène réticulé (PE-X), polybutène (PB), polychlorure de vinyle non plastifié, polypropylène (PP), acrylonitrile/butadiène/styrène (ABS), polyamide (PA).

À titre purement indicatif, nous rappelons quelques exemples :

- normes françaises et indices de classement : NF EN 10226, NF EN 12201, NF EN 13121, NF EN 13476, NF EN 1452, NF EN 1555, NF EN ISO 15874, NF EN ISO 15876, NF EN ISO 6224, NF EN ISO 6808, M88-557, P16-353, T47-257, T47-282, T54-016, T54-029, T54-063, T54-065, T54-938, T54-943, T54-944, T58000 ;
- normes internationales : ISO 11237, ISO 11922, ISO 1307, ISO 14531, ISO 15439, ISO 15439, ISO 15874, ISO 22621, ISO 264, ISO 6224, ISO 6808, ISO 8085, ISO 8283.

Pour entrer plus avant dans les détails, pour des pièces moulées, toutes choses égales par ailleurs, certains thermoplastiques ont été classés arbitrairement en trois groupes avec une indication approximative de la tolérance moyenne sur une dimension choisie *a priori* :

- groupe A – précision aisée à obtenir : PVC, polystyrène (PS) et dérivés, polyacétates (CA, CAB, CP), polyacrylique (PMMA), polycarbonate (PC). Tolérance moyenne de $\pm 0,4$ % ;
- groupe B – précision moyenne : polyéthylène (PE), polypropylène (PP). Tolérance moyenne de $\pm 0,7$ % ;
- groupe C – précision difficile à obtenir : polyamide (PA). Tolérance moyenne de ± 1 %.

Pour des profilés extrudés, plus les tolérances sont serrées, plus le prix de revient augmente. Toutes les cotes ne sont pas aussi facilement maîtrisables et on peut schématiquement les répartir en trois classes :

- classe A – facilement maîtrisables : avec, par exemple, des tolérances de 0,3 à 0,8 mm pour un profilé PVC rigide 3 chambres ;
- classe B – difficilement maîtrisables : tolérances de 0,45 à 1,2 mm ;
- classe C – très difficilement maîtrisables : tolérances de 0,6 à 2 mm.

Toujours sur le même type de profilés, les tolérances sur l'épaisseur e sont de l'ordre de :

- $\pm 0,1e$ mm jusqu'à $e = 1$ mm ;
- $\pm 0,03e + 0,1$ mm pour $e > 1$ mm.

1.2.4 Dépouilles et contre-dépouilles

Si la souplesse de la matière ne permet pas le démoulage des pièces avec contre-dépouilles, il faut que le moule comporte des parties mobiles conve- nables pour permettre le démoulage, ce qui augmente le coût et le risque d'apparition de traces aux plans de jonction de ces parties mobiles.

Pour des raisons techniques et économiques, la conception avec dépouille peut être indispensable pour permettre le démoulage de la pièce. En moyenne, l'angle de dépouille est de l'ordre de 1° . Il peut être plus faible pour les petites pièces ($0,5^\circ$ ou même $0,2^\circ$) mais devra être augmenté pour les pièces profondes (jusqu'à 2° ou 3°). Des conditions spéciales de moulage, par exemple cycles plus longs, permettent d'abaisser l'angle de dépouille.

1.2.5 Localisation des traces de moulage

Pour les pièces à caractère esthétique et pour des raisons de résistance méca- nique, il est souhaitable que les traces de lignes de joints, seuils d'alimenta- tion, éjecteurs, soient localisées dans des endroits peu visibles pour ne pas nuire à l'aspect de la pièce et dans des endroits peu sollicités mécaniquement pour des raisons de résistance.

1.2.6 Minimisation de l'anisotropie

Succinctement, le coefficient d'anisotropie est calculé en divisant la moyenne des valeurs d'une propriété mesurée sur des éprouvettes perpendiculaires au flux par la moyenne des résultats obtenus sur des éprouvettes parallèles à l'écoulement.

En pratique, les coefficients d'anisotropie sont souvent calculés sur les résis- tances et allongements à la rupture ou les contraintes et déformations au seuil viscoélastique mais on peut utiliser toute autre propriété intéressante pour l'utilisation envisagée. L'anisotropie des polymères ne peut pas être négligée dans les calculs de pièce, et le coefficient de sécurité devra l'inclure en tenant compte de la localisation des différents points et de la géométrie des pièces.

Les facteurs déterminants paraissent être :

- l'orientation moléculaire qui se développe lors du remplissage du moule ;
- la rhéologie du mélange ;
- les conditions de mise en œuvre ;
- le dessin du moule.

D'un point de vue théorique, les orientations moléculaires dues aux différents écoulements du polymère fondu sont mises en cause. Pour une pièce plate injectée par son centre, trois types d'écoulement entrent en jeu :

- un écoulement en cisaillement près des parois ;
- un écoulement élongationnel de type fontaine sur le front d'écoulement ;
- un écoulement élongationnel au cœur de la pièce.

Chaque type d'écoulement provoque une orientation particulière des macromolécules, qui peuvent se relaxer différemment pendant les diverses phases de traitement thermique, entraînant des gradients de température dans le volume de la pièce. Évidemment, les peaux, au contact direct des outillages, se réchauffent ou se refroidissent plus vite que le cœur, d'autant que la conductivité thermique de la matière plastique est faible. Pour les polymères chargés ou renforcés, une plus forte anisotropie peut provenir :

- d'une viscosité plus élevée du polymère à l'état fondu ;
- d'une diminution de la mémoire élastique ;
- d'évolutions rhéologiques diminuant le temps disponible pour la relaxation ;
- d'une orientation des particules et agrégats de charge, d'autant que leurs coefficients de forme sont élevés.

À titre d'exemple, dans une série d'essais sur des plaques de SBS ou de copolyester injectées par leur centre, les coefficients d'anisotropie varient entre 0,8 et 1,3 en fonction de la caractéristique retenue, résistance ou allongement à la rupture, contrainte ou déformation au seuil viscoélastique. Ces valeurs ne sont pas négligeables.

1.3 Choisir les grades adéquats

Les producteurs de matières plastiques commercialisent, pour une même famille, des grades adaptés aux différents procédés de transformation par leur présentation physique, leur degré de polymérisation, leur rhéologie, leur aptitude à la mise en solution, dispersion, pâte, etc. Il est donc indispensable de choisir le grade adapté au procédé de transformation réellement utilisé et de prendre en considération la totalité de ses caractéristiques pour la conception de la pièce ou du demi-produit, les performances pouvant différer d'un grade à un autre.

1.3.1 La rhéologie

La figure 1.5 indique, pour un même producteur, les larges possibilités de variation de l'indice de fluidité (MFI), dont le spectre s'étend, dans la même unité, de moins de 1 à plus de 100. À cela, il faut également ajouter la forme physique (granulés ou poudres de diverses granulométries), la présence de comonomères, l'incorporation d'agents glissants, etc. pour satisfaire finalement à la fabrication de feuilles, films, revêtements, pièces moulées par injection, rotomoulage, soufflage...

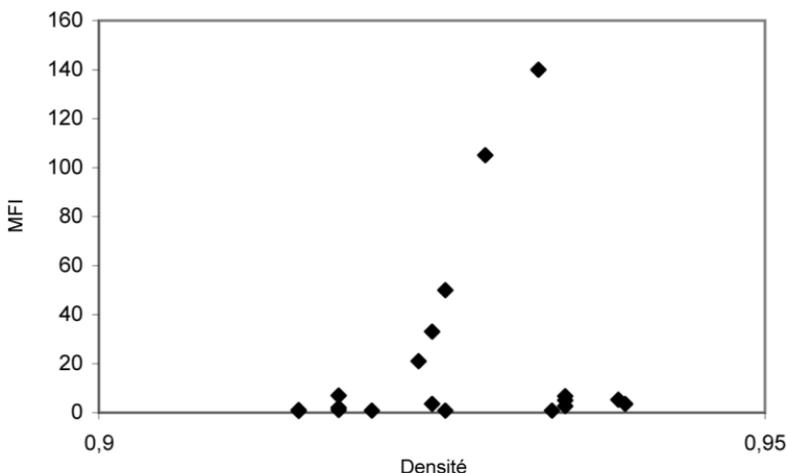


Figure 1.5 – Exemples de densités et MFI de polyéthylènes basse et moyenne densités.

Le cas du PVC est tout aussi édifiant avec :

- ses différents modes de polymérisation en émulsion, en suspension, en masse ;
- ses applications sous forme de plastisols ;
- ses copolymères ;
- les formulations plastifiées de PVC souple.

1.3.2 Le retrait et l'anisotropie

Un autre point important à examiner est le retrait après transformation. Des grades d'une même famille peuvent avoir des coefficients de dilatation et par suite des taux de retrait différents qui font que les outillages ne sont pas universels. D'une manière générale, les grades chargés d'une matière minérale isotrope ont un coefficient de dilatation et un retrait après transformation inférieurs à ceux du polymère vierge. Les grades renforcés fibres ont un retrait plus limité mais plus sensible à l'orientation. L'anisotropie est d'autant plus forte que le coefficient de forme de la fibre est élevé.

Les figures 1.6 et 1.7 illustrent les différences de retraits importantes entre :

- des polymères vierges de natures différentes : polypropylène (PP), polyacétal (POM), polyamide (PA), polyétherimide (PEI) ;
- des polymères vierges et renforcés fibres de verre courtes ;
- des polymères vierges et chargés de charges minérales isotropes.

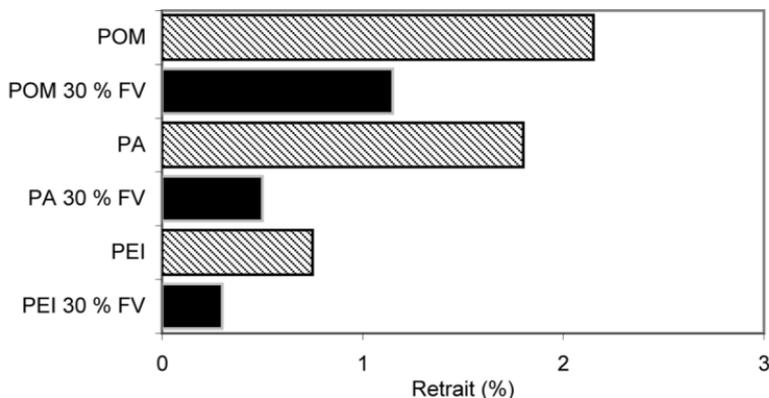


Figure 1.6 – Retrait de polymères vierges et renforcés fibres de verre.

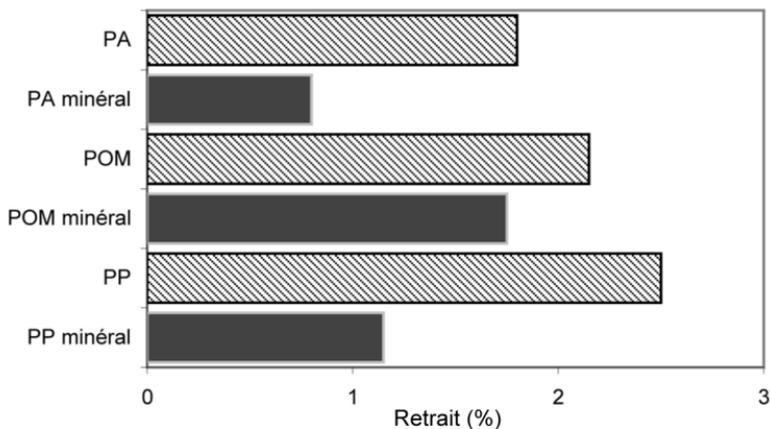


Figure 1.7 – Retrait de polymères vierges et renforcés charges minérales.

1.4 Éléments comparatifs sur les principaux procédés

Mis à part les conditions techniques déjà brièvement évoquées en ce qui concerne la forme physique des polymères, les principaux procédés de transformation se différencient par :

- la fréquence d'utilisation ;
- la nature des polymères à mettre en forme ;
- l'ampleur des séries à fabriquer ;
- les coûts.

1.4.1 Fréquence d'utilisation des différents procédés

Les fréquences d'utilisation des procédés sont très variées, l'injection en général et l'extrusion y compris films, tubes, tuyaux et feuilles par exemple, couvrant plus de 50 % de la production des pièces et demi-produits en matière plastique.

Pour les thermoplastiques, le soufflage constitue le troisième procédé alors que le calandrage, le poudrage, l'enduction, le thermoformage, le chaudronnage et

la confection sont moins utilisés. La place du moussage est difficile à quantifier car les tonnages sont faibles mais les volumes élevés. La figure 1.8 illustre la situation d'ensemble.

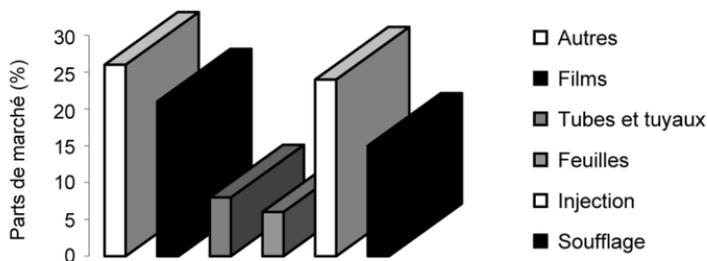


Figure 1.8 – Thermoplastiques : principaux procédés.

Pour les thermodurcissables et composites, les SMC et les composites thermodurcissables renforcés fibres de verre longue ou continue (TRE, ou GMT) tiennent des places prépondérantes, suivis par plusieurs procédés occupant chacun moins de 10 % du marché : BMC, contact, projection, moulage, moulage continu de feuilles et plaques, enroulement filamentaire, pultrusion. La place du moussage est, comme précédemment, difficile à quantifier. La figure 1.9 illustre la situation d'ensemble.

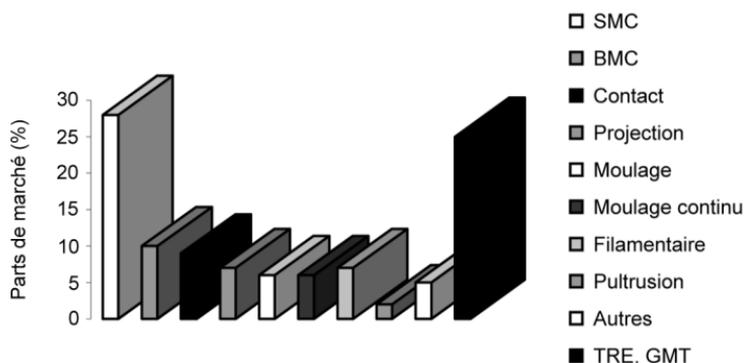


Figure 1.9 – Thermodurcissables et composites : principaux procédés.

1.4.2 Procédés et nature des polymères à mettre en forme

Tous les polymères ne peuvent pas être mis en forme par tous les procédés, ne serait-ce que par leur forme physique, solide ou liquide, et leur structure chimique, thermoplastique ou thermodurcissable. Les exemples suivants ont pour but de donner un éclairage sur les cas les plus courants.

L'injection, bien que couvrant un large spectre, ne peut pas s'appliquer aux PTFE, polybenzimidazole (PBI) et certains polyimides.

L'extrusion couvre également un large spectre mais ne s'applique qu'aux thermoplastiques, à l'exception de certains polyimides et du polybenzimidazole (PBI).

Le soufflage pourrait s'appliquer à un vaste panel de thermoplastiques mais, dans la réalité, concerne surtout les PVC, polyesters thermoplastiques, polyéthylènes (PE) et polypropylènes (PP).

Le rotomoulage concerne surtout les plastisols (PVC en pâte), les poudres de polyéthylènes (PE) ou de polyamides (PA), polycarbonates (PC). Du fait de la faible pression pendant la mise en œuvre, les caractéristiques mécaniques sont généralement plus faibles que celles des pièces injectées équivalentes.

Le moussage sous sa forme conventionnelle s'étend à la fois aux thermoplastiques et thermodurcissables tels que polyuréthanes, polystyrènes, polychlorure de vinyle (PVC), polyéthylènes (PE), EVA, polypropylènes, polyméthacrylimides, mélamines, phénoplastes, polycarbonates, polyétherimides, polyéther-sulfones, polyimides. Sous la forme d'allégés structuraux, pratiquement tous les plastiques pourraient être moussés.

Le thermoformage ne concerne que des thermoplastiques de grande diffusion tels que polystyrènes (PS), ABS, PVC, polyéthylènes (PE), polypropylènes (PP), polyesters thermoplastiques (PET) ou des thermoplastiques techniques comme les polyacrylates (PMMA), polyacétates (CA), polyoxyméthylènes ou polyacétals (POM), polycarbonates (PC), polyamides (PA), polyphénylèneéthers (PPE), polysulfones (PSU).

L'usinage est l'une des méthodes qui s'appliquent à toutes les ébauches ou pièces brutes de toutes matières plastiques. Cependant, il faut noter que l'usinage peut demander un traitement de reconstitution de la surface dans le cas des composites par exemple.

Le chaudronnage concerne les thermoplastiques dont les plus utilisés sont les PVC, PVC surchlorés (PVCC), PE, PP, PVDF, polyacrylates (PMMA).

Le soudage n'est utilisable que pour les thermoplastiques non réticulés. Ainsi, le PE-X n'est pas soudable après réticulation. Les caractéristiques mécaniques

des soudures sont généralement plus faibles que celles des pièces injectées équivalentes.

Le collage concerne pratiquement tous les plastiques mais est plus ou moins difficile suivant leur nature et conduit à des performances mécaniques qui peuvent être inférieures ou supérieures à celles des matériaux à assembler. En cas de sollicitation allant jusqu'à la rupture, celle-ci peut se produire dans le joint de colle ou dans la masse des matériaux à coller.

Les procédés SMC, BMC, moulage au contact et par projection concernent uniquement les thermodurcissables, principalement les polyesters insaturés (UP), phénoplastes, polyuréthanes, époxydes.

Le moulage de plaques en continu est utilisé pour les plaques ondulées de couverture en polyesters insaturés (UP).

L'enroulement filamentaire ne s'applique qu'aux composites renforcés de filaments continus.

La pultrusion concerne des composites renforcés uniquement de filaments unidirectionnels.

Le drapage concerne à la fois des composites à matrices thermoplastiques ou thermodurcissables.

Les composites thermoplastiques, TRE ou GMT, sont évidemment limités aux matrices thermoplastiques. Ils ont pris une place importante à côté des composites thermodurcissables ou en compétition avec ceux-ci et continuent à se développer.

Le prototypage rapide et l'*e-manufacturing* utilisent des résines spécialement conçues à cet effet de façon à contreyper les propriétés des différentes familles de plastiques conventionnels.

L'injection des métaux en poudre utilise des matières plastiques comme liant, mais la pièce finale est constituée uniquement du métal fritté.

1.4.3 Procédés et volumes de production

L'ensemble des procédés de mise en œuvre couvre toutes les capacités de production, de l'unité à la très grande série comme l'automobile. Si, théoriquement, plusieurs procédés peuvent être utilisés pour un même problème, le choix sera fait en fonction des volumes à produire et des coûts acceptables. Par exemple, pour un démarrage de pièces, on pourra passer successivement du prototypage (une pièce à quelques pièces) à l'usinage (quelques pièces à une centaine de pièces), puis au moulage par injection.

Le tableau 1.2 suggère des ordres de grandeur, qui peuvent toujours souffrir de nombreuses exceptions pour diverses raisons techniques, pratiques ou

économiques découlant d'un contexte particulier. Ces renseignements sont généraux et donnés seulement à titre indicatif pour se faire une première idée des possibilités, impossibilités et coûts. Les valeurs ne peuvent être directement utilisées pour un choix définitif de solution ou établissement des prix. Les coûts relatifs des pièces sont calculés par rapport à l'injection en grande série prise pour base 1.

Tableau 1.2 – Procédés de transformation des thermoplastiques : importance des séries et coûts relatifs des pièces, l'injection étant prise pour base 1.

Procédé	Importance des séries	Coûts de production comparatifs
<i>Injection</i>	1 000 000	1
	1 000	14
<i>Soufflage</i>	1 000 000	1,5
	1 000	12
<i>Rotomoulage, matériel élaboré</i>	1 000 000	2,5
	100	16
<i>Thermoformage</i>	10 000	5
	10	16
<i>Rotomoulage, matériel de base</i>	1 000	6
	10	15
<i>Confection, usinage, découpe, soudage, collage...</i>	1 000	12
	1	14

Le tableau 1.3 schématise quelques caractéristiques techniques de divers procédés concernant les thermodurcissables et composites. Ces renseignements sont généraux et donnés seulement à titre indicatif pour se faire une première idée des possibilités et impossibilités. Les valeurs ne peuvent être directement utilisées pour un choix définitif de solutions ou pour l'établissement des prix.

Tableau 1.3 – Thermodurcissables et composites : exemples de choix de procédés en fonction des dimensions des pièces.

Aire maximale (m ²)	Épaisseur (mm)	Méthode	Qualité de la surface**	Exemples
Quasi illimitée (couramment < 300)	Quasi illimitée (couramment 2-10)	Moulage au contact	1	Bateaux
Quasi illimitée	Quasi illimitée (couramment 2-10)	Projection	1	Bateaux
15	1-10	Injection de résine	2	Éléments de carrosserie
15	3-10	Compression à froid	2	Éléments de carrosserie
5	1-6	Compression à chaud avec mats et préformes	2	Éléments de carrosserie
5	2-10	Compression à chaud des prepress	2	Éléments de carrosserie
10	Limitée	RRIM	1	Capotages
Limitée	Limitée	Injection haute pression	1 ou 2	Pièces pour électricité, électronique
20		Autoclave	1 ou 2	Éléments pour aéronautique
4	Limitée	Estampage	2	Pièces pour automobile
Diamètre de 5 cm à 25 m*	1-10 et plus	Enroulement filamentaire	1 ou 2	Réservoirs sous pression
30	3-15	Centrifugation	1	Tubes, tuyaux
Section limitée	3-20	Pultrusion	1 ou 2	Profilés
Section limitée	1-4	Moulage continu de plaques	2	Plaques ondulées de couverture

* Fabrication sur matériel spécialement construit. ** 1 : meilleur aspect.

1.4.4 Coûts de transformation

Le coût de la transformation ne peut pas être isolé du prix des matières premières, constitué principalement du coût des résines. Celui-ci, surtout pour des matériaux tels que les polyoléfines principalement constitués de dérivés du pétrole et d'énergie, subit directement les variations de prix du pétrole. Les fortes fluctuations observées en 2008 font que la réalité économique peut largement différer des indications suivantes.

Pour les polymères matières premières, les prix au kilogramme s'échelonnent très approximativement de l'ordre de 1 € pour les commodités à plusieurs dizaines d'euros pour les spécialités.

D'après les études du ministère de l'Industrie, *Industrie française de la plâtrerie* et *Industrie française des matériaux composites*, parues en 2002 :

- pour les compounds de commodités, le prix au kilogramme de la matière première est multiplié, en moyenne, par environ 1,3 pour un prix de vente moyen de 1,15 €/kg ;
- pour les thermoplastiques extrudés, le prix au kilogramme de la matière mise en œuvre est multiplié, en moyenne, par environ 1,35 pour un prix de vente moyen de 2,4 €/kg ;
- pour les thermoplastiques moulés, le prix au kilogramme de la matière mise en œuvre est multiplié, en moyenne, par environ 1,5 (mais un facteur 2 est courant). Les prix de vente moyens s'échelonnent de 4 €/kg pour l'emballage à 11 €/kg pour des pièces techniques ;
- les composites, même de grande diffusion, ont toujours une valeur ajoutée élevée, et les prix de vente au kilogramme s'échelonnent d'environ 3 € à plus de 30 € pour une gamme de composites allant de la grande diffusion courante aux hautes performances pour l'aéronautique.

Si les pourcentages indiqués ci-dessus restent valables, ce qui n'est pas prouvé à cause des coûts énergétiques par exemple, les prix de vente en euros devraient être corrigés des fluctuations du coût des résines, valorisées à de faibles niveaux dans cette étude.

Le tableau 1.4 présente schématiquement quelques caractéristiques économiques relatives à divers procédés concernant les thermodurcissables et composites. Ces renseignements sont généraux et donnés seulement à titre indicatif pour se faire une première idée des possibilités, impossibilités et coûts. Les valeurs ne peuvent être directement utilisées pour un choix définitif de solutions ou pour l'établissement des prix.

Tableau 1.4 - Exemples de caractéristiques économiques de quelques procédés.

Procédé	Série	Temps de cycle	Investissement	Coût de main-d'œuvre
Moulage au contact	1-1 000	30 min à quelques jours	Faible	Élevé
Projection	1-1 000	30 min à quelques jours	Faible	Élevé
Injection de résine	200-10 000	30 min à quelques jours	Moyen	Moyen
Compression à froid	500-20 000	5-30 min	Moyen à élevé	Moyen
Compression à chaud avec mats et préformes	Production de masse	1-10 min	Élevé	Moyen
Compression à chaud des prepregs	Production de masse	2-5 min	Élevé	Faible à moyen
RRIM	1 000-250 000	Rapide		Moyen
Injection haute pression	> 10 000	Rapide	Élevé	Faible
Autoclave	< 5 000	Lent	Moyen	Moyen
Estampage	Moyenne série	Rapide	Moyen	Faible
Enroulement filamentaire	< 10 000	Suivant les pièces	Élevé	Élevé
Centrifugation		30 min à quelques jours	Élevé	Faible
Pultrusion	Continu	Continu	Élevé	Faible
Moulage continu de plaques	Continu	Continu	Élevé	Faible

Si les coûts de certaines pièces plastiques peuvent surprendre, il faut les relativiser en considérant le contexte dans son ensemble. Pour des pièces techniques, par rapport au métal :

- le coût d'une pièce en plastique renforcé fibres de verre (PRV) pour plate-forme offshore est généralement supérieur à celui de l'acier au carbone (1,5 à 2,5 fois) mais identique ou inférieur à celui des matériaux résistants à la corrosion. Cependant, les frais d'installation sont réduits (temps de montage pouvant être divisé par 4, moyens de transport et de levage moins lourds) et les coûts installés ne sont plus que de :
 - 60 à 90 % par rapport à l'acier au carbone,
 - 40 à 80 % par rapport à l'acier inox ;
- le coût d'une plaque de stratifié époxy/fibres de carbone (5 kg) est environ 10 fois celui d'une plaque d'acier (94 kg) destinée au renforcement d'ouvrages existants. Le surcoût se justifie cependant pour des interventions en conditions difficiles : ouvrages très isolés, difficiles d'accès, inaccessibles aux moyens de manutention lourds ;
- pour une voiture de TGV à deux niveaux, le coût du composite est 4 fois plus élevé que celui de l'aluminium mais il suffit de coller deux demi-coques moulées au lieu d'effectuer de nombreuses soudures sur le modèle métallique. L'économie substantielle en temps d'assemblage compense le coût matière.

Pour un certain nombre de procédés de transformation, la BFP (British Plastics Federation) propose des courbes d'un indice de prix unitaire en fonction du nombre de pièces produites. Ces courbes, qui peuvent être modélisées par des équations de puissances à exposants négatifs, conduisent aux ordres de grandeur du tableau 1.5.

Tableau 1.5 – Indice de prix en fonction des quantités produites.

Nombre de pièces	Usinage	Contact	Roto-moulage simple	Roto-moulage évolué	Thermo-formage	Soufflage	Injection
1	> 100						
10	> 100	100					
100	> 100	30	45				
1 000		20	15	50	20		
10 000				40	10	15	30
100 000				5		3	4
1 000 000				4		2	< 2

2 • OPÉRATIONS EN AMONT ET AVAL

A

CRÉER UN CONTEXTE FAVORABLE À LA TRANSFORMATION

Pour préparer la mise en forme des matières plastiques, certaines opérations générales sont souvent nécessaires alors que d'autres, plus spécifiques, sont justifiées par la structure chimique des polymères, réticulation ou durcissement des thermodurcissables, ou par l'état physique comme le détensionnement ou la post-cristallisation. La figure 2.1 recense les opérations prises en compte dans la suite mais il faut noter que toutes ne sont pas systématiquement nécessaires dans chaque cas.

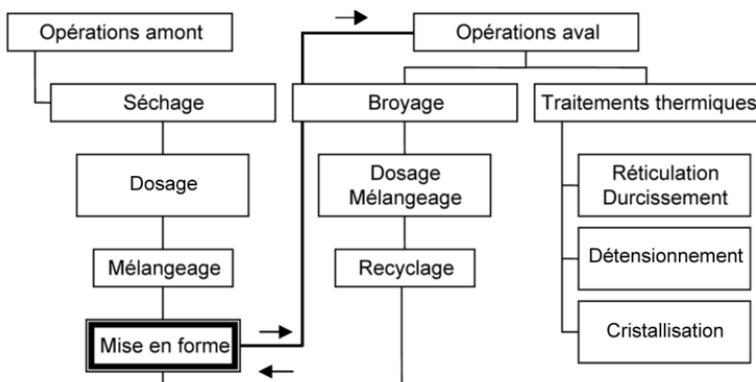


Figure 2.1 – Exemples d’opérations en amont et aval de la transformation.

2.1 Préparer les résines

La préparation des résines commence par leur stockage dans les meilleures conditions possibles d'environnement sec et tempéré, à l'abri de la lumière et des produits agressifs. Le stockage dépend des quantités mises en jeu, pouvant se faire dans les sacs d'origine fermés, en petits conteneurs mobiles de quelques dizaines de kilogrammes et en conteneurs fixes jusqu'aux silos extérieurs de plus de 100 t.

L'organisation judicieuse du stockage permet :

- l'achat des matières premières en quantités optimales pour obtenir des conditions avantageuses ;
- une surveillance efficace des stocks et des mouvements de matières ;
- l'utilisation optimale de la surface disponible ;
- la réduction des erreurs et des pertes.

Le transport automatique par aspiration à vide protège la matière, évite les pertes et améliore la productivité de l'entreprise.

2.1.1 Séchage

Bien que les résines soient souvent fournies dans un état d'hygrométrie acceptable, il peut être nécessaire de les sécher ou déshydrater avant alimentation des lignes de mise en forme. Les polymères absorbent plus ou moins d'eau et y sont plus ou moins sensibles aux températures plus ou moins élevées de transformation. L'absorption d'eau peut être très rapide. À titre d'exemple, un grade donné de polycarbonate reprend 0,05 % d'eau après 1 h dans l'air à 65 % d'hygrométrie relative.

La figure 2.2 montre les faibles pourcentages d'absorption d'eau en 24 h des résines de grande diffusion, polyéthylènes, polypropylènes, polystyrènes et PVC rigides. Pour leurs dérivés, EVA, EVOH pour les polyéthylènes, ABS pour le polystyrène et PVC plastifié pour le PVC, les situations sont beaucoup plus contrastées avec notamment la forte capacité d'absorption d'eau de l'EVOH due aux groupements hydroxyles. Les chiffres indiqués sont loin des pourcentages de saturation qui peuvent être atteints pour des sacs ouverts depuis plusieurs jours dans un climat humide et chaud ou dans un atelier à forte hygrométrie.

La figure 2.3 montre la diversité des pourcentages d'absorption d'eau en 24 h due à la diversité des structures chimiques des résines examinées. L'échelle logarithmique est la même que celle de la figure 2.2.

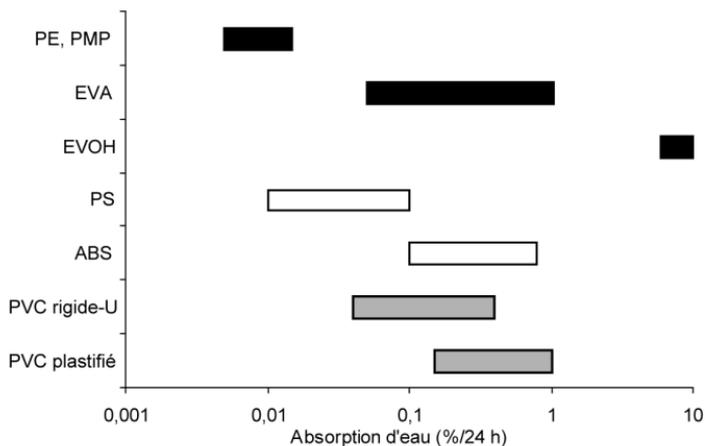


Figure 2.2 – Exemples d'absorption d'eau des thermoplastiques de grande diffusion et de certains de leurs dérivés.

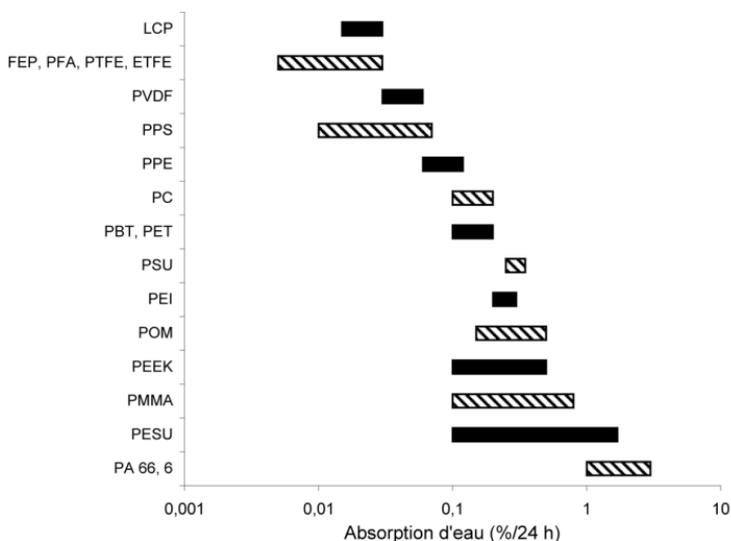


Figure 2.3 – Exemples d'absorption d'eau des thermoplastiques d'ingénierie.

Les producteurs conseillent souvent, pour certains grades, de descendre à moins de 0,02 % d'humidité relative pour l'injection.

L'humidité absorbée peut conduire à deux types de défauts aux températures élevées de mise en forme :

- phénomène physique dû à la vaporisation de l'eau. Les défauts d'aspect qui en résultent peuvent prendre la forme de bulles, moussage, raies d'écaillage radiales partant du point d'injection... ;
- phénomène chimique : hydrolyse provoquant la dégradation des polymères en affectant leurs propriétés mécaniques et pouvant entraîner leur jaunissement. Pour un grade donné de polyester thermoplastique, la perte de résistance au choc atteint 30 % en utilisant un granulé ayant repris un taux d'humidité non précisé.

Le taux d'humidité peut jouer également sur la stabilité dimensionnelle, les propriétés électriques et l'aptitude à la métallisation.

Le tableau 2.1 montre que toutes les propriétés mécaniques d'un thermoplastique sensible à l'humidité ne sont pas influencées au même degré. La résistance au choc entaillé perd pratiquement 50 % de sa valeur alors que le module reste constant.

Tableau 2.1 – Thermoplastique sensible à l'humidité :
exemples de variations de propriétés en fonction de l'humidité.

Teneur en humidité à l'alimentation (%)	0,03	0,07	0,14	0,26	0,40
Résistance à la traction (MPa)	139	116	112	107	105
Module de traction (GPa)	10	10	10	10	10
Choc Izod avec barreau entaillé (J/m)	101	69	64	53	53
Choc traction (J/mm ²)	0,12	0,10	0,09	0,09	0,08

En plus des précautions classiques :

- ouverture des sacs le plus tard possible,
- réétuvage des granulés restés plus de 2 h à l'air ambiant,
- séchage des rebroyés,

– remplissage des trémies avec des quantités limitées (2 h de production, par exemple),

il est souvent nécessaire d'utiliser des dispositifs de séchage continu automatiques qui assurent le maximum de sécurité quant aux qualités d'aspect et de propriétés mécaniques des produits injectés.

À titre indicatif, le tableau 2.2 montre la diversité des temps et températures de séchage suivant les différents types de thermoplastiques.

Tableau 2.2 – Exemples de conditions de séchage.

Polymère	Plage de températures (°C)	Durée de séchage (h)
PVC	60-80	1,5
PPO	80-95	maximum 2
	95-120	maximum 2
PMMA	75	2
ABS chaleur	90-95	2,5
CA	65-80	2-3
PC	120-140	2-4
PET - PBT	90-120	2-4
PEI	120-150	2-4
POM	90	4
PSU	110	4
PUR	80	4
PA	80-90	3-6

Les conditions réelles à adopter sont celles définies par le producteur, pour le grade qui sera réellement utilisé. Pour certains thermoplastiques, il ne faut pas dépasser les temps indiqués.

L'air est susceptible de se charger en humidité d'autant que sa température est élevée et que son hygrométrie est faible. Les sécheurs en continu peuvent donc être répartis en deux grandes catégories : à air simplement réchauffé, à air chaud et déshydraté. Ces derniers sont plus efficaces et pratiquement indispensables dans certains cas, tels que pour les polyesters.

■ Sécheurs à air chaud

L'air réchauffé est injecté par un ventilateur à la base de la trémie, traverse la matière à sécher en se chargeant d'humidité et s'échappe par le couvercle de la trémie.

Le séchage peut être :

- individuel avec montage direct sur la machine de transformation ;
- centralisé pour traiter la matière desservant plusieurs lignes de transformation. Le sécheur doit être doté d'un distributeur automatique de matière pour alimenter correctement les différentes lignes de transformation suivant leur débit.

En plus de la capacité, de la puissance installée et de la consommation énergétique (tableau 2.3), il faut examiner les caractéristiques particulières telles que :

- homogénéité de la répartition de l'air dans la masse des granulés ;
- débit d'air ;
- calorifugeage ;
- température maximale ;
- dispositifs de sécurité notamment thermique.

Les sécheurs à air chaud sont tributaires de l'hygrométrie de l'air ambiant. Leur efficacité varie avec les saisons et avec les régions. Ils sont beaucoup moins efficaces dans les régions chaudes en saison fortement humide. En revanche, ils sont peu onéreux et sont particulièrement recommandés pour les matières relativement peu hygroscopiques.

Toutes choses égales par ailleurs, les performances dépendent de la résine, de son humidité initiale et de l'humidité finale demandée.

Tableau 2.3 – Exemples de caractéristiques de sècheurs à air chaud.

Capacité utile (l)	Débit d'air sec (m ³ /h)	Pression d'air soufflerie (bar)	Puissance du chauffage (kW)	Puissance du ventilateur (kW)	Consommation moyenne à 80 °C (kW/h)
50	40	0,04	2,7	0,55	1,6
100	70	0,07	3,9	0,55	2,3
200	170	0,10	5,4	0,55	3
400	270	0,15	8,4	0,55	4,5
800	470	0,20	20	0,55	10
1 200	680	0,25	25	0,75	12,8

Les performances sont très variables, comme on pourra le voir dans le tableau 2.4 donnant les débits de matières séchées à 0,02 % d'humidité en fonction des polymères, du matériel, de la capacité trémie, du temps et de la température de séchage.

Tableau 2.4 – Exemples de conditions de séchage dans des sècheurs à air chaud.

		PA	PC	PBT	PP
Température (°C)		80	120	120	90
Durée (h)		4	3-4	4	1
		Débits de résine séchée (kg/h)			
Capacité de la trémie (l)	50-70	7-16	7-20	7-10	20-25
	160-200	30-40	30-90	20-30	70-120
	400-500	70-120	70-170	70-90	250-300
	1 000-1 200	220-230	230-330	200-250	550-700

■ Sécheurs à air chaud déshydraté

L'air est desséché par passage sur des produits très hygroscopiques ou sur des tamis moléculaires, puis est réchauffé avant de passer à travers la masse de matière à sécher, où il se charge d'humidité. L'air est recyclé et les produits desséchants sont régénérés automatiquement ou suivant une teneur maximale en eau pour conserver leur efficacité. Les sècheurs à air chaud déshydraté sont moins tributaires de l'hygrométrie de l'air ambiant. Leur efficacité varie peu avec les saisons et avec les régions. En revanche, ils sont plus onéreux et sont particulièrement recommandés pour les matières fortement hygroscopiques. En plus de la capacité, de la puissance installée, de la consommation énergétique, de l'homogénéité de la répartition de l'air dans la masse des granulés, du débit d'air, du calorifugeage, de la température maximale, des dispositifs de sécurité notamment thermique, il faut étudier

précisément la nature des produits desséchants, leurs conditions de régénération et de renouvellement. L'installation de séchage peut être :

- individuelle avec montage direct sur la machine de transformation ;
- centralisée pour traiter la matière desservant plusieurs lignes de transformation. Le sécheur doit être doté d'un distributeur automatique de matière pour alimenter correctement les différentes lignes de transformation suivant leur débit.

Toutes choses égales par ailleurs, les performances dépendent de la résine, de son humidité initiale et de l'humidité finale demandée.

Les performances sont très variables, comme on pourra le voir dans le tableau 2.5 donnant les débits de matières séchées à 0,02 % d'humidité en fonction des polymères, du matériel, de la capacité trémie, du temps et de la température de séchage.

Tableau 2.5 – Exemples de conditions de séchage dans des sécheurs à air chaud déshydraté.

Température maximale (°C)	Débit d'air (m ³)	Consommation à 80 °C (kW)	Débit de résine séchée (kg/h)
180	30	3-20	3-25
130-180	100	4	30-70
130-180	200	12	70-200
130-180	400-500	16-20	140-480
130-180	800-1 000	30-50	300-800

Le tableau 2.6 propose quelques exemples de fournisseurs de matériel.

Tableau 2.6 – Exemples de constructeurs ou distributeurs de matériel.

Société	Site Internet
Beweplast	www.beweplast.com
Colortronic	www.colortronic.de
Mann+Hummel Protec	www.mh-protec.com
Martiplast	www.martiplast.com
Moretto	www.moretto.com
Motan	www.motan.com
Piovan	www.piovan.com
Spiroflux	www.spiroflux.com
Wittmann	www.wittmann-france.com

2.1.2 Dosage, mélangeage

Les polymères se présentent souvent sous forme de granulés, chips, poudres, etc. ou plus rarement sous forme liquide ou pâteuse, dispersions ou latex, solutions, plastisols... Les différents ingrédients (agents de protection, charges ou renforts, plastifiants...) sont liquides, solides, pulvérulents ou pâteux.

En général, les ingrédients d'une formulation sont introduits dans le(s) polymère(s) par mélangeage en phase solide :

- discontinu :
 - *dry blends*,
 - mélangeurs ouverts à cylindres,
 - mélangeurs internes à rotors ;
- continu :
 - à vis, type extrudeuse à simple ou double vis,
 - spécifique,
 - réactif.

Plus rarement, les mélanges sont réalisés en phase liquide pour les polyuréthanes, certains polyamides, latex ou dispersions.

Remarquons que, dans le mélangeage par voie solide, certains additifs comme les plastifiants ou les colorants peuvent être à l'état liquide alors que, dans le cas du mélangeage par voie humide, certains ingrédients peuvent être pulvérulents, comme les charges par exemple.

Dans tous les cas, le mélangeage doit assurer trois objectifs majeurs concernant les ingrédients :

- un dosage exact ;
- une distribution régulière dans l'ensemble de la matrice ;
- une dispersion homogène avec une granulométrie aussi fine et régulière que possible ;
- la bonne qualité des liaisons physico-chimiques ingrédients-polymères.

Dans le cas du mélangeage réactif, il faut également assurer la qualité et l'homogénéité de la réaction chimique ciblée.

La figure 2.4 indique un certain nombre de voies possibles sans couvrir la totalité des éventualités.

La réussite du mélangeage conditionne la qualité de la pièce ou du demi-produit final et permet des économies d'additifs onéreux tels que les agents de protection, nettement plus efficaces s'ils sont bien dispersés. Un mélangeage défectueux ne peut pas être compensé lors des opérations de mise en forme.

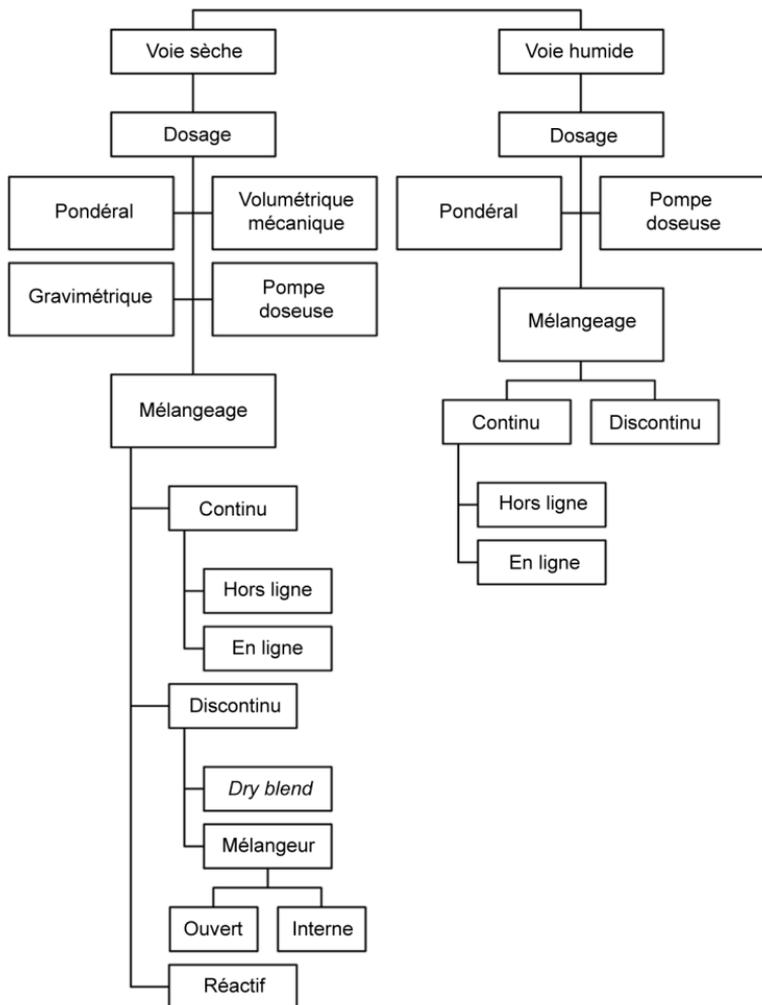


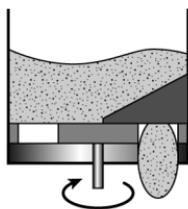
Figure 2.4 – Exemples de possibilités de mélangeage.

■ Dosage

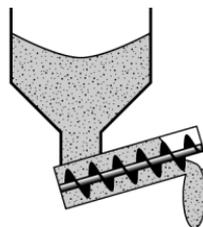
Différentes techniques (figures 2.5 et 2.6) peuvent être adoptées dont la plus ancienne consiste tout simplement à peser les polymères et autres ingrédients. Les avantages de simplicité et de précision des mesures s'accompagnent malheureusement de plusieurs inconvénients, notamment une main-d'œuvre importante et des risques d'erreurs dus à la multiplicité des opérations.

L'addition et le mélangeage en ligne d'additifs, tels qu'agents gonflants, anti-glissants, antistatiques, ignifugeants, stabilisants, anti-UV, mélanges maîtres et colorants, présentent un grand intérêt lorsqu'ils permettent de :

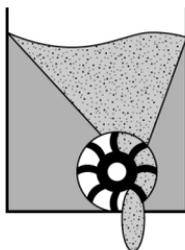
- standardiser un grade de base qui peut être acheté en grande quantité ;
- simplifier la gestion des stocks ;
- réduire les coûts et surfaces de stockage.



Doseur à disque
à alvéoles

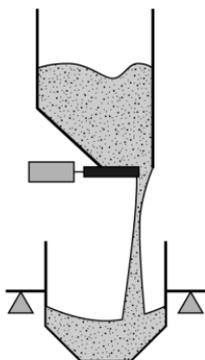


Doseur à vis

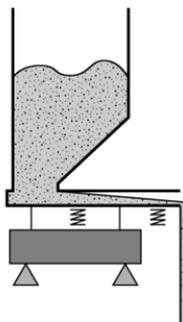


Doseur à roue

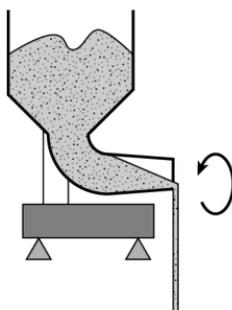
Figure 2.5 – Exemples de doseurs volumétriques (avec l'aimable autorisation de la société Motan).



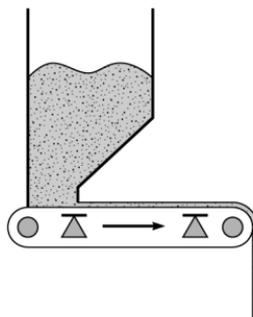
Doseur à lumière réglable



Doseur à vibrations séquencées



Doseur à manchette



Doseur à courroie

Figure 2.6 – Exemples de doseurs gravimétriques
(avec l'aimable autorisation de la société Motan).

Parmi les techniques automatisées, les différents principes examinés dans la suite sont :

- le dosage par vis ;
- le dosage volumétrique par remplissage d'alvéoles ou chambres calibrées ;
- le dosage pondéral par mesure du taux d'allègement ou du taux d'entraînement.

Un certain nombre de précautions particulières doivent être prises lors du choix du principe et de la sélection du matériel. Il faudra veiller, entre autres, à :

- la précision et la fiabilité du dosage, notamment dans les faibles débits ;
- l'efficacité du mélangeage ;
- la rapidité et la fiabilité du réglage ;
- la rapidité et la qualité du nettoyage ;
- la possibilité de synchronisation avec le fonctionnement de la machine de transformation ;
- les possibilités d'adaptation aux différents additifs.

En ce qui concerne les additifs eux-mêmes, il faut que leur forme de présentation soit compatible avec la résine et avec le matériel de dosage à disposition, de façon à éviter :

- les sédimentations ;
- les stratifications ;
- les retenues à certains endroits du matériel.

Doseurs à vis

Une vis située à la base de la trémie de stockage entraîne la matière à un débit fonction de la vitesse de rotation pour un couple déterminé matière/vis. La matière dosée peut :

- déboucher librement dans une trémie d'alimentation ;
- se mélanger naturellement à un autre flux de matière dosée par le même principe ;
- aboutir dans une chambre de mélangeage forcé où elle rencontre la ou les autres matières également dosées.

Ce système convient bien au dosage de granulés.

Sur les principes exposés ci-dessus, différentes variations sont proposées :

- monovis de divers dessins ;
- bavis à effet auto-nettoyant ou démottant ;
- version spéciale pour produits fragiles ;
- doseurs multiples adaptables sur la même installation : en général 4 maximum, parfois 6 ;
- asservissement à la machine de transformation ;
- exécution en matériaux spéciaux, acier inoxydable, par exemple ;
- addition de matériels auxiliaires comme les grilles magnétiques, alarmes de niveau...

Le tableau 2.7 présente quelques caractéristiques de doseurs à titre indicatif.

Tableau 2.7 – Exemples de caractéristiques de matériels.

Débit (kg/h)	Nombre de doseurs maximal	Puissance par doseur (kW)	Capacité de la trémie (dm ³)	Capacité du mélangeur (dm ³)
8	1	0,1	12	3
50	1	0,2		
6-100		0,1	20	
150	2	0,5	50	
250	3	0,5		
500	2	0,6	15	15
500	6			
650	4	0,6		
1 000	3	0,7	40	25
1 000	4	0,8		
1 500	2	0,8	400	

Doseurs volumétriques à alvéoles ou chambres calibrées

Plusieurs systèmes coexistent, par exemple :

- un cylindre comportant des alvéoles calibrées entraîne une quantité dosée de matière, fonction de la vitesse de rotation ;
- une chambre calibrée est remplie de matière, par aspiration par exemple, puis vidangée par ouverture d'un clapet. Le débit est proportionnel au nombre de cycles de remplissage/vidange par unité de temps.

Sur ces principes, différentes variations sont proposées :

- adaptation aux mélanges maîtres ou aux pulvérulents ;
- version spéciale pour produits fragiles ;
- doseurs multiples adaptables sur la même installation ;
- asservissement à la machine de transformation ;
- exécution en matériaux spéciaux, acier inoxydable, par exemple ;
- addition de matériels auxiliaires comme les grilles magnétiques, alarmes de niveau... ;
- couplage de plusieurs appareils avec une chambre de mélangeage.

Les plages de débits possibles sont généralement d'une étendue limitée pour un appareil donné mais peuvent couvrir un vaste spectre, de moins de 1 à 800 kg/h pour les divers modèles, par exemple :

- 0,4 à 1,5 kg/h ;
- 0,9 à 5 kg/h ;
- 0,5 à 100 kg/h ;
- 20 à 60 kg/h ;
- 100 à 800 kg/h.

Dosage pondéral par mesure du taux d'allègement ou d'entraînement

Plusieurs systèmes coexistent, par exemple :

- taux d'allègement : la trémie de stockage et le système d'extraction sont montés sur une balance. La vitesse d'extraction est réglée, en continu, en fonction de la perte de poids par unité de temps, de façon à respecter la valeur de débit affichée. Lorsque le niveau de la trémie arrive au minimum choisi, l'alimentation automatique de la trémie est déclenchée. L'extracteur peut être monovis ou bivis, avec dispositif vibrant ou doseur à bande. Des adaptations granulés, pulvérulents, liquides, sont proposées. La précision des dosages peut être très élevée et la plage des débits très étendue, par exemple de 0,1 kg/h pour le plus petit modèle à 6 000 kg/h pour le plus gros modèle d'un même constructeur ;
- taux d'entraînement : mesure du poids entraîné par unité de temps, par une bande. La vitesse d'extraction est réglée en continu en fonction du poids extrait, de façon à respecter la consigne de débit.

Le tableau 2.8 précise quelques exemples de fournisseurs de matériel.

Tableau 2.8 – Exemples de constructeurs ou distributeurs de matériel.

Société	Site Internet
Colortronic	www.colortronic.fr
Kongskilde	www.kongskilde.com
K Tron	www.fr.ktron.com
Moretto	www.moretto.com
Motan	www.motan.com
Piovan	www.piovan.com
Spiroflux	www.spiroflux.com
Transitube	www.transitube.fr

■ Mélangeage

La diversité et la multiplicité des techniques et matériels de mélangeage, depuis les fouets pâtisseries encore utilisés pour les dispersions et latex jusqu'aux méga-mélangeurs pour compounds, rendent le classement difficile et forcément incomplet. La figure 2.7 illustre schématiquement les principales fonctions et les nombreuses exigences concernant les problèmes de mélangeage des polymères et additifs.

Comme pour beaucoup de matériels, les mélangeurs comportent certains risques et doivent satisfaire aux législations et règlements de sécurité, généraux ou spécifiques, en vigueur sur le site d'exploitation.

Parmi les différents problèmes, nous avons choisi de traiter :

- le mélangeage de produits secs ou *dry blends*. Ces procédés ne traitent que la fonction « distribution » ;
- le mélangeage des polymères à l'état fondu, qui prend en compte la totalité des fonctions ;
- le mélangeage des liquides et pâtes, excluant la fonction « mastication » ;
- le mélangeage statique, qui peut prendre en compte la totalité des fonctions.

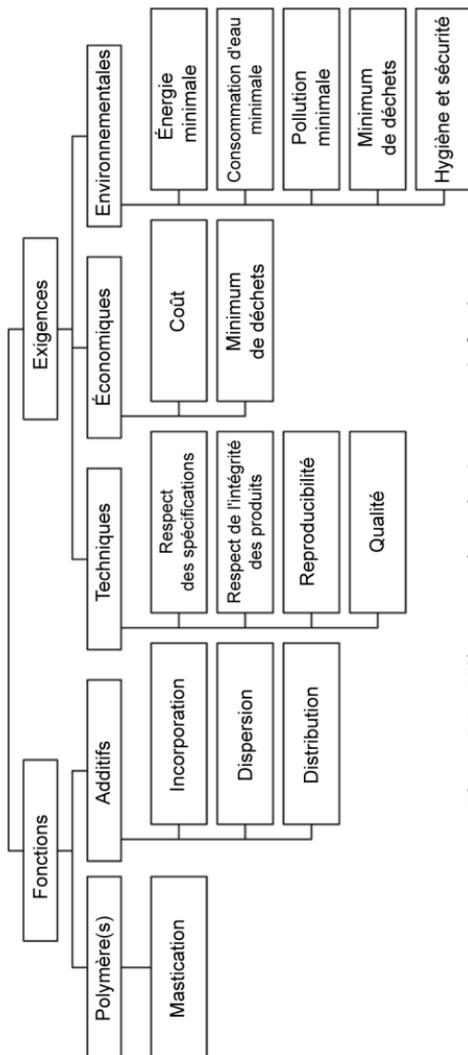


Figure 2.7 – Mélangeage des polymères par voie fondue.

□ Mélangeage de produits secs ou dry blends

Outre les trémies doseuses vues précédemment, le mélangeage au tonneau et ses techniques dérivées sont largement utilisés. Un fût ou un tonneau incomplètement rempli tourne sur un de ses axes, ce qui provoque le mélangeage des produits secs. Le mélangeur à poudre biconique en est une évolution. La rusticité du matériel, le faible coût et le large choix de modèles de fûts permettent de dédier chaque fût à une formule déterminée, réduisant ou supprimant les opérations de nettoyage.

D'autres types dits « mélangeurs à poudre verticaux » comportent une vis verticale qui fait remonter les produits à mélanger jusqu'à ce qu'ils retombent naturellement d'eux-mêmes avec un effet fontaine assurant le mélangeage de mélanges maîtres, additifs ou rebroyés...

Des mélangeurs continus horizontaux à rotors de formes diverses ou à vis sont également utilisés soit pour le mélangeage à sec, soit pour l'incorporation d'additifs dans les matrices plastiques.

□ Mélangeage de produits secs par trémies doseuses

La figure 2.8 illustre le principe du mélangeage de granulés et/ou de pulvérisés par deux trémies doseuses déversant les produits dans une chambre de mélangeage éventuellement munie d'un dispositif d'agitation motorisé, marqué « M » dans le schéma.

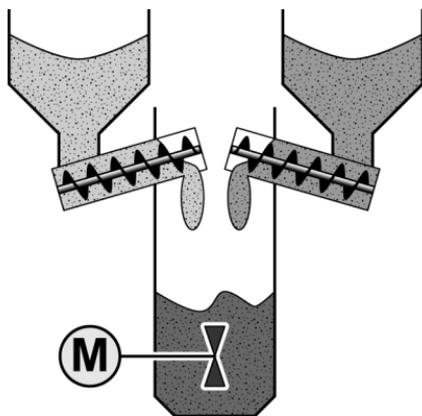


Figure 2.8 – Mélangeage de produits secs par trémies doseuses (avec l'aimable autorisation de la société Motan).

□ Mélangeage des polymères à l'état fondu

Plusieurs types coexistent répondant à des objectifs différents et correspondant à des investissements plus importants que ceux nécessités par les mélangeurs à poudre. Dans tous les cas, le polymère est réchauffé et suffisamment ramolli pour permettre l'incorporation des particules liquides ou solides des additifs.

Mélangeurs ouverts à cylindres

Ils sont constitués de deux cylindres horizontaux, parallèles (figure 2.9), tournant en sens inverses de façon à ramener la matière vers le dessus de la ligne de contact des cylindres. Les vitesses, faibles (10 à 20 tr/min), sont généralement dans un rapport de 1,1 à 1,25 pour créer une friction qui augmente le travail mécanique nécessaire pour l'incorporation des ingrédients.

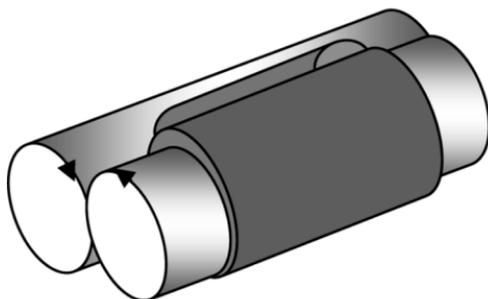


Figure 2.9 – Schéma d'un mélangeur à cylindres.

Ces cylindres comportent des circuits internes permettant le chauffage à la vapeur ou le refroidissement à l'eau et ont des dimensions plus ou moins importantes (diamètre \times longueur : 500 \times 1 000 ou 500 \times 1 500 mm par exemple).

Ce matériel, dont le principe est ancien, a été continuellement perfectionné et est toujours utilisé. Il est très robuste, simple d'emploi mais la productivité est limitée. Les capacités de traitement dépendent des dimensions et vitesses des cylindres, du choix de leur écartement, de la nature des polymères et des additifs à incorporer.

Le tableau 2.9 donne des exemples de caractéristiques de mélangeurs à cylindres.

Tableau 2.9 – Exemples de caractéristiques de mélangeurs à cylindres.

Dimension des cylindres (mm × mm)	620 × 500	1 500 × 500	1 600 × 500	1 800 × 600	2 100 × 665
Puissance (kW)	90	90-110	90-110	130	130

Mélangeurs internes

Le principe est plus récent que le précédent mais la technique est bien éprouvée et a donné naissance à plusieurs variantes concernant la forme des rotors, les vitesses et les conceptions mécaniques.

Dans le principe, une chambre de mélangeage contient deux rotors engrenants ou non, portant des pales de forme hélicoïdale tronquée. La chambre est fermée par un piston permettant de maintenir une pression sur le mélange pour intensifier l'action de mélangeage. La température est régulée par circulation de fluide. Suivant les modèles, les vitesses des rotors sont égales ou créent un rapport de friction.

À capacité donnée, le matériel est plus important que pour les mélangeurs à cylindres. Pour les modèles de moyenne ou forte capacité, l'orifice de chargement est couramment au premier étage pour une cuve de mélangeage au rez-de-chaussée et un dispositif de réception du mélange terminé situé sous la machine. L'investissement est très élevé, les cycles sont rapides (quelques minutes pour des charges de 50 à 200 kg) mais, dans certains cas, il est nécessaire de terminer le mélangeage par un passage sur mélangeur ouvert pour affiner la dispersion. Ce type de matériel se prête à l'automatisation.

Les dimensions de cuves, les modèles de rotors et leur positionnement relatif, la pression sur la matière à traiter, les caractéristiques thermiques, puissance de chauffe ou de refroidissement vont conditionner, en conjugaison avec la vitesse de rotation, les capacités de mélangeage pour un polymère et une formulation fixés. Les puissances installées sont élevées, de l'ordre de 2 à 10 kW par litre utile pour les exemples cités.

Le tableau 2.10 indique quelques exemples de caractéristiques de mélangeurs internes pour polymères.

Tableau 2.10 – Exemples de caractéristiques de mélangeurs internes pour polymères.

Volume utile (l)	31	53	59	62	123	140	177	200	276	422
Volume total (l)	42	70	80	84	160	182	237	270	370	620
Puissance minimale (kW)	112	112	112	150	600	300	220	1 120	1 120	1 120
Puissance maximale (kW)	350	450	450	600	800	900	1 500	1 500	2 200	3 730
Coefficient de remplissage	0,7	0,8	0,7	0,7	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7
kW/litre utile, minimum	3,6	2,1	1,9	2,4	4,9	2,1	1,2	5,6	4,1	2,7
kW/litre utile, maximum	11	8	8	10	7	6	8	7,5	8	9

Mélangeurs continus

C'est la technique la plus récente, qui fait l'objet de nombreuses variations dérivant plus ou moins de l'extrudeuse simple ou double vis engrenantes ou non. Des doigts ou des anneaux peuvent venir compléter l'action mécanique provoquée par l'extrusion. Ce principe d'extrusion peut être combiné avec celui des chambres de mélangeur interne, et des pompes à engrenage peuvent compléter ces dispositifs pour assurer une pression plus régulière des produits à traiter. Des dispositifs de dégazage sont prévus pour les fractions volatiles des polymères et additifs.

Le grand intérêt réside dans les possibilités d'automatisation, les faibles coûts de main-d'œuvre, la reproductibilité des conditions de traitement, le lissage des consommations électriques. En revanche, ces procédés ne sont pas adaptés aux petites productions.

Les tableaux 2.11 et 2.12, bien que non exhaustifs, font ressortir la diversité des matériels. Les diamètres de vis vont conditionner – en conjugaison avec la vitesse de rotation, le profil de vis et les accessoires – les capacités de mélange pour un polymère et une formulation fixés. Les diamètres de vis varient dans de larges plages, de 18 à 380 mm, dans les exemples cités, et les débits peuvent atteindre plusieurs tonnes de mélange à l'heure.

Tableau 2.11 – Exemples de caractéristiques de mélangeurs continus.

Diamètre de vis (mm)	Profondeur de pas (mm)	Couple par arbre (Nm)	Vitesse de rotation (tr/min)	Puissance (kW)
18	3,2	38	1 200	10
25	4,5	106	1 200	28
32	5,6	245	1 200	65
40	7,1	510	1 200	135
50	8,9	980	1 200	259
58	10,3	1 500	1 200	396
70	12,5	2 730	1 200	720
92	16,3	6 000	1 000	1 319
118	20,8	12 400	1 000	2 727
133	23,5	18 100	1 000	3 980
177	31,5	35 000	550	4 233
248	44,0	97 000	400	8 532
315	55,8	200 000	310	13 634
352	62,6	281 000	280	17 301
380	67,4	356 000	260	20 354

Tableau 2.12 – Exemples de débits et de puissance de mélangeurs continus.

Puissance (kW)	Débits (kg/h)	Puissance (kg/h)
55-75	200-400	0,19-0,27
75-150	400-800	0,19
225-450	1 800-2 500	0,12-0,18
375-1 000	1 850-3 700	0,2-0,27

Mélangeurs statiques

Les mélangeurs statiques sont constitués d'éléments statiques standardisés qui provoquent la division des flux d'écoulement et leur réorganisation, contribuant à la dispersion et à la distribution des différents constituants. Ils améliorent, en plus, l'homogénéité de la température dans l'espace et le temps. Montés dans le fourreau d'une extrudeuse ou d'un dispositif de mélangeage, ils ne comportent aucune pièce en mouvement et sont donc naturellement robustes. Outre la géométrie, responsable de la qualité du mélangeage, ils diffèrent par les diamètres, le nombre, l'alternance des éléments standardisés, les systèmes de positionnement, la facilité de démontage et de nettoyage.

Mélangeage des liquides et pâtes

Le mélangeage des produits franchement liquides – latex et diverses dispersions, émulsions et solutions d'additifs – ne pose pas de réel problème dans la mesure où les divers matériaux ont été convenablement formulés pour assurer une compatibilisation optimale. L'opération peut s'effectuer par toutes les méthodes conventionnelles de mélangeage de liquides en continu ou discontinu.

Le mélangeage des produits pâteux et collants est plus délicat, faisant appel à l'extrusion ou à divers matériels détournés de leurs applications premières. Citons, par exemple, les pétrins et malaxeurs à bras plus ou moins complexes ou à palettes. Le choix du type de matériel sera guidé par les propriétés rhéologiques des matériaux à traiter, certains systèmes ne pouvant pas supporter mécaniquement les efforts exercés par les mastics et

autres masses à forte viscosité. Les possibilités de régulation thermique sont évidemment à prendre en compte, l'élévation de la température favorisant la diminution des viscosités mais pouvant également déclencher des réactions chimiques indésirables. Les installations doivent être faciles à nettoyer avec des cuves de mélangeage interchangeable et mobiles.

Les dimensions de cuves, les modèles de rotors et leur positionnement relatif, les caractéristiques thermiques, puissances de chauffe ou de refroidissement vont conditionner, en conjugaison avec la vitesse de rotation, les capacités de mélangeage pour un polymère et une formulation fixés.

Les tableaux 2.13 et 2.14 mettent en évidence la diversité des matériels. Les puissances installées sont variables pour une même capacité de cuve mais restent très inférieures à celles des mélangeurs internes dans des rapports pouvant aller jusqu'à 1 pour 50. Il est évident que les produits pouvant être traités par l'un et par l'autre seront complètement différents.

Tableau 2.13 – Exemples de caractéristiques de mélangeurs de tous principes jusqu'à 500 l.

Volume utile (l)	0,25	0,75	1,0	2,5	2,5	5,0	8,0	20	40	80	200	450
Volume total (l)	0,40	1,10	1,50	3,75	3,75	7,50	12,00	30	60	120	260	570
Puissance (kW)	0,25	0,37	0,55	0,75	1,75	1,10	1,50	5	9	15	11	16
Coefficient de remplissage	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8
kW/litre utile	1	0,5	0,6	0,3	0,7	0,2	0,2	0,25	0,2	0,2	0,06	0,04
Vitesse de rotation (tr/min)	63-42	56-37	52-25	43-25	38-109	43-25	43-25	30-20	30-20	30-20	27-18	23-15
Longueur (m)	0,5	0,7	1,2	1,3	1,7	1,4	1,5	1,5	1,6	2,2	2,6	3,1
Profondeur (m)	0,3	0,4	0,3	0,3	0,6	0,4	0,4	0,6	0,7	0,9	1,2	1,4
Hauteur (m)	0,3	0,3	0,6	0,6	1,5	0,7	0,8	1,2	1,3	1,5	1,8	2,2

Tableau 2.14 – Exemples de caractéristiques de mélangeurs discontinus de tous principes jusqu'à 5 000 l.

Volume utile (l)	680	900	900	1 500	1 500	2 000	2 000	2 000	3 000	3 000	3 000	4 300
Volume total (l)	850	1 120	1 350	1 900	1 900	2 600	2 600	3 000	3 800	4 500	4 500	6 450
Puissance minimale (kW)	16	21	21	27	27	33	33	33	37	37	37	41
Puissance maximale (kW)	42	51	51	66	66	78	78	78	89	89	89	96
Coefficient de remplissage	0,8	0,8	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	0,8	0,7	0,8	0,7
kW/litre, minimum	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01
kW/litre, maximum	0,06	0,06	0,06	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02
Vitesse de rotation (tr/min)	23-15	23-15	23-15	21-14	21-14	19-13	19-13	19-13	15-10	15-10	15-10	13-9
Longueur (m)	3,5	3,8	3,8	4,3	4,3	4,8	4,8	4,4				
Profondeur (m)	1,6	1,6	1,9	1,8	2,1	2	2,4					
Hauteur (m)	1,7-3	2-3	2-4	2-4	2-3	2-4	3-4					

Pompes doseuses

Les pompes doseuses peuvent doser volumétriquement ou pondéralement, en continu ou par impulsions. L'injection dans les polymères peut nécessiter de hautes pressions, par exemple 1 500 bar.

Le tableau 2.15 propose quelques exemples de fournisseurs de matériel.

Tableau 2.15 – Exemples de constructeurs ou distributeurs de matériel.

Société	Site Internet
Agimel	www.agimel.fr
Atem	www.atem.eu
Battenfeld-Gloucester	www.cms.battenfeld.com
Berstorff	www.berstorff.com
Bühler	www.buhlergroup.com
Comerio Ercole	www.comercole.it
Coperion	www.coperion.com
Farpi-France	www.farpi.fr
Farrel	www.farrel.com
Gericke	www.gericke.net
Kobelco Stewart Bolling	www.ksbiusa.com
KraussMaffei Berstorff	www.kraussmaffei.com
Leistritz	www.leistritz.de
Lodige	www.loedige.de
Mitchell	www.mitchell-dryers.co.uk
Moretto	www.moretto.com
Papenmeier	www.loedige.de
Wuma	www.wuma-projekt.pl
XMix	www.xmixmixer.com

2.1.3 Broyage des déchets de fabrication

En diminuant la consommation de matières vierges et en réduisant les déchets ultimes, le broyage et le recyclage des matières plastiques répondent à des impératifs économiques et environnementaux. Ils s'appliquent facilement aux polymères thermoplastiques :

- de grande diffusion : PE, PP, PVC rigide ;
- d'ingénierie : ABS, PB, PMMA ;
- de spécialité : PVDF, etc.

L'application aux thermodurcissables est moins évidente à cause de la réticulation, qui les rend infusibles. Le broyage est plus difficile, surtout en présence de fibres de verre, et doit être mené jusqu'au stade de la poudre, le recyclat se comportant souvent comme une charge plus ou moins inerte au lieu de remplacer du polymère vierge comme dans le cas des thermoplastiques.

Les déchets de production ou les produits rebutés sont broyés et transformés en granulés grâce à une vaste gamme de broyeurs ou granulateurs (figure 2.10) couvrant un large éventail de débits et de puissances avec des modèles spécialisés suivant le type de produit à récupérer et le type de produit à obtenir :

- carottes ;
- pièces de grandes dimensions (habillages de téléviseur, pare-chocs, chaises, etc.) ;
- tubes et tuyaux ;
- profilés, plaques ;
- films, feuilles ;
- chutes de thermoformage ;
- mousses, etc.

Les produits à obtenir dépendent des procédés de réutilisation :

- broyé pour injection ;
- poudre pour rotomoulage ;
- broyé pour extrusion, etc.



Figure 2.10 – Broyeur Lancelin
(avec l'aimable autorisation de Broyeurs Lancelin).

Le tableau 2.16 montre la diversité des modèles de broyeurs. Les débits s'échelonnent de quelques kilogrammes à plus d'une tonne à l'heure, les puissances de moins de 1 à plus de 40 kW, les vitesses de 20 à 500 tr/min ou plus pour les exemples du tableau 2.16. Les cotes d'encombrement et les poids peuvent permettre le montage sur machines de transformation ou nécessiter une installation importante au sol.

Tableau 2.16 – Exemples de caractéristiques de broyeurs.

Puissance (kW)	Vitesse (tr/min)	Production (kg/h)	Encombrement (H × I × L)	Poids (kg)
0,37	112			30
0,5	25	10-15	400 × 520 × 620	
0,5	25	25	1 000 × 600 × 1 400	
1,1	25	15-20	400 × 400 × 1 060	
1,1	150	10-15		
1,1	170		1 180 × 480 × 1 150	
1,6	25	20-30	400 × 400 × 1 230	
2,2				135
2,2	170		1 180 × 580 × 1 150	
3	200		1 300 × 900 × 1 350	155
3	350	40-80		
3		150-250		
5	350	60-100		
6		300		
8		450		
11	58	450		2 800
11		500		
11-15	630			750-900
11-18	500			1 200
13		700		
15-18	500	700		1 400

Tableau 2.16 – Exemples de caractéristiques de broyeurs. (suite)

Puissance (kW)	Vitesse (tr/min)	Production (kg/h)	Encombrement ($H \times l \times L$)	Poids (kg)
16		800		
18-30	450			1 750
18-22	650	200-400		
22	58	900		4 800
27		1 100		
29-37	530	300-600		
37-44	530	400-800		
55	58	1 500		6 500
110		4 000		

Devant la versatilité des matériels, il faut donc bien définir la catégorie d'appareil que l'on recherche. En plus des questions classiques sur le débit et la puissance, il faut examiner les paramètres tels que, par exemple :

- mode de broyage, échauffement matière, possibilité de réglage de la grosseur des particules, absence de fines... ;
- possibilité d'intégration en ligne, dimensions de l'appareil ;
- accessoires intégrés et accessoires à rajouter ;
- type de refroidissement : air ou eau ;
- bruit, ces appareils étant destinés à fonctionner en ateliers ;
- sécurité d'emploi : les broyeurs sont, de par leur fonction, source de danger et doivent répondre aux législations en vigueur sur les sites d'utilisation ;
- facilité de la maintenance des pièces d'usure ;
- coût de la maintenance ;
- facilité de nettoyage.

Les accessoires, intégrés ou non, concernent :

- l'alimentation : vis sans fin, tapis roulant, séparateur de carottes ;
- tamis pour le contrôle de la granulométrie ;

- séparateur de métaux : magnétiques, inductifs ;
- dépeussierage : électro-ventilateur et cyclone de recueil ;
- évacuation : vis sans fin, aspiration et cyclone, reprise par alimentateur ;
- système de dosage : recyclé/vierge.

Broyage : le principe doit être étudié pour donner la production optimale avec la consommation d'énergie, l'échauffement et un niveau de bruit minimaux. La multiplication du nombre de lames permet de diminuer la vitesse et de gagner en efficacité.

L'alimentation par vis entraîne le fractionnement des carottes avant leur arrivée dans le système de broyage proprement dit.

Vitesse : de plus en plus de constructeurs proposent des modèles à vitesse lente, jusqu'à 25 tr/min sur certains modèles. Les avantages résident dans une réduction de l'échauffement de la matière, du bruit et une meilleure homogénéité des dimensions de particules et une diminution des fines.

Le réglage de la granulométrie peut se faire par tamis, grille ou par rouleaux dentés.

Systèmes de sécurité : tous les constructeurs font des efforts pour améliorer les systèmes de sécurité, qui doivent être conformes aux normes nationales. Beaucoup de dispositifs sont doublés et certains sont dits « inviolables ».

Les niveaux sonores font l'objet d'améliorations successives mais peuvent rester d'un niveau élevé, par exemple de 70 à 84 dB (A).

Facilité d'utilisation et de maintenance : les problèmes d'utilisation sont principalement liés à l'accessibilité en respectant la sécurité, les risques de bourrage à l'alimentation, l'usure des organes de broyage, la possibilité de réaffûter les couteaux, la facilité et la rapidité de changement des pièces d'usure, la fréquence des interventions, la facilité de nettoyage. Certains constructeurs proposent des dispositifs simplifiant le remplacement des pièces d'usure, modèles à cassettes par exemple.

Les broyeurs peuvent être montés individuellement sur ou à côté de chaque matériel de transformation ou desservir plusieurs lignes de transformation ou un ensemble d'ateliers.

Micronisation de poudres

Certains modes de transformation nécessitent des poudres fines des polymères obtenues par micronisation mécanique. Le procédé est applicable à pratiquement tous les types de thermoplastiques tels que les polyéthylènes (PE-BD, LPE-BD, PE-MD, PE-HD), polypropylènes (PP), EVA, polycarbonates (PC) et ABS. Les équipements de micronisation pulvérisent les

matières plastiques pour obtenir des poudres d'une granulométrie inférieure à 1 mm répondant aux exigences de la mise en œuvre par rotomoulage, enduction, poudrage. La pulvérisation nécessite souvent un broyage préliminaire sur un broyeur à couteaux.

Le tableau 2.17 précise quelques exemples de fournisseurs de matériel.

Tableau 2.17 – Exemples de constructeurs ou distributeurs de matériel.

Société	Site Internet
A2 Plast	www.a2p.biz
Beweplast	www.beweplast.com
Farpi-France	www.farpi.fr
Herbold	www.herbold.com
Lancelin	www.broyeurs-lancelin.fr
Martiplast	www.martiplast.com
Moditec	www.moditec.fr
Pallmann	www.pallmann.eu
Piovan	www.piovan.com
Polymix Equipement	www.polymix.fr
Rapid	www.rapidgranulator.se
Tria	www.tria.it
Wanner	www.wanner-technik.de
Weima	www.weima.com

2.2 Optimiser l'état final des polymères : recuits, durcissement et réticulation

Hors traitements de surface, les propriétés de certains polymères peuvent être améliorées par des opérations postérieures à la mise en forme. Les principales sont :

- des traitements thermiques purs ou recuits modifiant la structure physique ;
- des modifications chimiques ressortant du domaine de la réticulation ou du durcissement.

2.2.1 Recuits

Les recuits consistent à chauffer les pièces en étuve ou en bain de liquide à une température suffisante pour permettre les réarrangements moléculaires mais insuffisante pour provoquer une dégradation ou une déformation des pièces.

Suivant la façon dont ils sont conduits, les recuits peuvent avoir des effets bénéfiques ou néfastes :

- libérer les contraintes internes et améliorer l'isotropie ;
- accroître la cristallinité ;
- provoquer des post-retraits ;
- provoquer ou faciliter des compléments de réticulation ;
- induire des réactions chimiques diverses ;
- entraîner une thermodégradation plus ou moins importante suivant la durée et la température.

Ces traitements thermiques peuvent améliorer certaines propriétés et en dégrader d'autres. L'augmentation de résistance et de module peut être accompagnée d'une diminution des allongements et de la résistance au choc. Les températures de traitement dépendent essentiellement de la nature du polymère et sont souvent proches de la température de déformation sous contrainte.

Le matériel n'est généralement pas spécifique, consistant en étuves ou en bains thermostatiques avec possibilité de programmer des variations de température. Des formes ou conformateurs adaptés aux pièces à traiter peuvent être utilisés pour éviter les déformations.

Outre les problèmes de sécurité liés aux températures élevées, les principaux points à surveiller portent sur l'homogénéité des températures et sur la possibilité d'atteindre les températures nécessaires, le temps ne permettant pas de suppléer à une température insuffisante.

Le tableau 2.18 indique quelques exemples théoriques de recuits, qui peuvent être complètement modifiés dans la réalité en fonction des propriétés recherchées.

Tableau 2.18 – Exemples de recuits.

Polymère	Durée (h)	Température (°C)
<i>Polyphénylène sulfure (PPS)</i>	1	204
<i>Polyamide imide (PAI)</i>	24	165
	24	245
	24	260
<i>Élastomère copolyester (COPE)</i>	20	100
<i>Polyuréthane thermoplastique (TPU)</i>	15-20	80-120

2.2.2 Durcissement et réticulation, post-cuisson

La réticulation est indispensable pour que les thermodurcissables soient utilisables industriellement mais certains thermoplastiques – polyéthylène, EVA, PVC, polyester thermoplastique... – peuvent être utilisés en l'état ou après réticulation.

L'aptitude à la réticulation dépend fondamentalement de la constitution chimique du polymère permettant de lier chimiquement les chaînes entre elles, l'ajout d'agents de réticulation (peroxydes, accélérateurs, photo-initiateurs, etc.) ne contribuant qu'à la viabilité industrielle du procédé. En pratique, la réticulation s'applique à tous les thermodurcissables et à certains thermoplastiques tels que les polyéthylènes, EVA et, plus rarement, les PVC, les polystyrènes et les polypropylènes.

Sont généralement améliorées :

- les propriétés mécaniques ;
- la tenue thermique et par suite la température de service ;
- la résistance au fluage ;
- la résistance chimique y compris la résistance au *stress cracking*, ou fissuration sous contrainte, pour les polymères qui y sont sensibles.

Bien évidemment le caractère thermoplastique disparaît, empêchant le soudage et compliquant le recyclage.

Pour des pièces ou demi-produits formulés pour être réticulables, la réaction peut être déclenchée par chauffage par :

- air chaud ou fluide caloporteur en étuves, autoclaves fours, bains thermorégulés, tunnels, etc. ;
- HF, micro-ondes ou UHF. Seuls les mélanges polaires peuvent s'échauffer et réticuler ;
- infrarouge en étuves, fours ou tunnels, etc. ;
- photopolymérisation sous rayonnement ultraviolet ;
- polymérisation sous irradiation.

La réticulation est souvent intégrée au procédé de mise en forme et nous n'examinerons ici que le cas contraire des traitements postérieurs.

■ Réticulation sous UV

Les polymères sont plus ou moins sensibles et transparents aux UV, qui permettent la réticulation en faible épaisseur des résines convenablement choisies et formulées pour réaliser, par exemple, des revêtements décoratifs, des encres, des adhésifs, des dispositifs électroniques et optoélectroniques, des revêtements de fibres optiques...

Les performances des installations dépendent, entre autres, des longueurs d'onde situées dans les 200 à 400 nm, des puissances et types de lampes, et de l'inertage de l'atmosphère de traitement. Bien que certains producteurs de revêtements préconisent des niveaux très faibles d'oxygène, inférieurs à 50 ppm, d'autres admettent des concentrations beaucoup plus élevées.

Dans ses applications, la réticulation par exposition aux UV peut apporter des avantages économiques, techniques et environnementaux avec d'excellentes productivités pour de faibles coûts et des économies d'énergie sensibles.

Le choix du matériel devra prendre en compte la longueur d'onde des lampes, la puissance, l'ingénierie générale, l'intégration dans le contexte industriel, le respect des règles de sécurité spécifiques.

■ Réticulation sous HF et UHF

Les micro-ondes sont essentiellement utilisées pour les communications et la détection radar. Certaines fréquences ont cependant été réservées aux applications industrielles, scientifiques et médicales : 13,56 MHz, 27,12 MHz, 40,68 MHz et également 433 MHz pour les HF ; 2 450 MHz et 915 MHz pour les micro-ondes.

Les avantages mis généralement en avant pour les micro-ondes concernent :

- la pénétration instantanée au cœur des matériaux, qui entraîne une élévation rapide de la température avec un gain de temps et un meilleur rendement ;
- la possibilité de combinaison avec d'autres procédés thermiques, air chaud par exemple ;
- la souplesse des réglages et la rapidité des mises en route et des arrêts ;
- l'absence de pertes d'énergie par rayonnement de chaleur ;
- un meilleur rendement énergétique.

Si les fréquences conventionnelles des micro-ondes, de 0,915 et 2,45 GHz, conviennent bien à la vulcanisation des caoutchoucs, elles sont peu adaptées à la cuisson de grosses pièces en composites. On utilise alors une longueur d'onde plus grande, de 13 à 40 MHz, du domaine des HF. Les micro-ondes produites par le générateur sont appliquées sur le produit grâce à un applicateur. On distingue :

- les cavités monomodes ;
- les cavités multimodes ;
- les guides d'ondes rayonnants ;
- les guides d'ondes fendus.

Certaines installations ne supportent pas la présence de métaux et ne peuvent servir pour les pièces avec inserts métalliques.

Le choix du matériel devra prendre en compte la longueur d'onde, la puissance, le type de cavité, la combinaison éventuelle avec un autre mode de chauffage, la tolérance envers les parties métalliques telles que des inserts, l'ingénierie générale, l'intégration dans le contexte industriel, le respect des règles de sécurité spécifiques.

■ Réticulation sous irradiation

Les radiations ionisantes peuvent provoquer la réticulation des polymères mais également des scissions et cyclisations de chaînes nuisibles aux performances

mécaniques. La dégradation est amplifiée en présence de l'oxygène de l'air. La résistance des polymères dépend de leur structure chimique et de leur formulation.

Pour une application industrielle, il faut évidemment que les réticulations l'emportent sur les dégradations, ce qui, pour un polymère donné, dépend des doses de radiation.

Les techniques industrialisées de production de radiations ionisantes sont :

- des sources au cobalt 60 (^{60}Co) ou au césium 137 (^{137}Cs) pour l'irradiation gamma ;
- des accélérateurs (rayonnement β), qui peuvent être classés suivant leur niveau d'énergie :
 - faible énergie jusqu'à $\approx 0,5$ MeV pour les films et revêtements de faible épaisseur,
 - énergie moyenne jusqu'à 5 MeV pour les films, feuilles et composites en épaisseur courante,
 - haute énergie jusqu'à 10 MeV pour les tuyaux, feuilles épaisses, plaques et composites en forte épaisseur.

Les doses dépendent des épaisseurs de parois, du type de polymère et de sa formulation, par exemple :

- 30-160 kGy pour des revêtements et des mousses ;
- 70-250 kGy pour des films et gaines thermorétractables ;
- 80-400 kGy pour des pièces courantes.

D'un point de vue économique, la radio-réticulation est moins gourmande en énergie que la thermo-réticulation. Par exemple, pour le même type de pièce fabriqué avec le même polymère dans une formulation adaptée à chacun des procédés, la consommation d'énergie est de 80 J/g pour l'irradiation et de 280 J/g pour la réticulation thermique soit 3,5 fois plus.

Les investissements sont souvent lourds ou très lourds et la sous-traitance peut être une solution intéressante que ce soit pour la réticulation sous irradiation gamma ou sous faisceau d'électrons.

Le tableau 2.19 indique quelques exemples de constructeurs ou distributeurs de matériel de réticulation.

Tableau 2.19 – Exemples de constructeurs ou distributeurs de matériel.

Société	Site Internet
A2 Plast	www.a2p.biz
Albis	www.albis.com
Araytech	www.araytech.fr
Acim-Jouanin	www.acim-jouanin.fr
Beweplast	www.beweplast.com
Capri (CEA Saclay)	–
Equiptec	www.equiptec.com
Farpi-France	www.farpi.fr
Hönle UV	www.honleuv.fr
Martiplast	www.martiplast.com
Sairem	www.sairem.com
Wittmann	www.wittmann-france.com

B

Procédés de transformation

Les procédés de mise en œuvre des plastiques sont extrêmement variés, s'adaptant suivant les cas aux matières solides ou liquides plus ou moins pâteux, thermoplastiques ou thermodurcissables, monolithiques, homogènes ou composites. Plusieurs systèmes de classement sont généralement utilisés, aucun n'étant véritablement satisfaisant à cause des interactions des différents paramètres et des nombreux cas particuliers. Nous avons choisi une répartition en trois grandes catégories tenant compte des caractères chimiques et physiques des matériaux :

- les thermoplastiques monolithiques, ou « homogènes », contenant de la résine pure et, éventuellement, des charges minérales ou fibreuses de faibles dimensions et de coefficients de forme limités. Ces résines n'ont pas besoin, sauf exception, d'être réticulées et les fibres éventuellement utilisées sont assez courtes pour assurer un écoulement considéré comme suffisamment régulier et isotrope ;
- les thermodurcissables monolithiques, ou « homogènes », contenant de la résine pure et, éventuellement des charges minérales ou fibreuses de faibles dimensions et de coefficients de forme limités. Contrairement au cas précédent, ces résines doivent être réticulées après la mise en forme mais les fibres éventuellement utilisées sont assez courtes pour assurer un écoulement considéré comme suffisamment régulier et isotrope ;
- les composites constitués d'un assemblage de résine thermoplastique ou thermodurcissable et de fibres longues ou continues et de renforts divers. Les renforts ont des coefficients de forme élevés qui entraînent des comportements tout à fait anisotropes. Les matrices thermodurcissables doivent être réticulées après la mise en forme.

Les familles de matière étant choisies, il faudra considérer leur état physique, solide ou liquide plus ou moins pâteux.

Enfin les matières plastiques peuvent être transformées :

- en une seule étape aboutissant directement à la pièce finie par une opération de *première transformation*, ce qui est le cas de l'injection haute pression des thermoplastiques et thermodurcissables ;
- en deux étapes, en fabriquant d'abord un demi-produit tel que feuille, plaque ou jonc par un procédé de première transformation puis en le transformant en pièce finie dans une opération subséquente dite de *seconde transformation*.

Comme beaucoup d'autres matériaux, les pièces en matières plastiques peuvent nécessiter des opérations de finition et certaines pièces peuvent être réparées après endommagement.

Les procédés de première transformation comprennent principalement l'injection et ses procédés dérivés, l'extrusion, l'injection-soufflage et extrusion-soufflage, l'extrusion-gonflage, le rotomoulage, les autres formes de moulage y compris des liquides, le moussage sous diverses formes, le calandrage et diverses techniques particulières dont celles utilisées pour la transformation des composites. L'injection bien que venant, pondéralement, en deuxième position derrière l'extrusion, représente une classe plus homogène utilisée par un plus grand nombre d'entreprises.

Les procédés de seconde transformation utilisant des semi-produits issus de la première transformation sont, par exemple, le thermoformage, l'estampage, l'usinage, le chaudronnage, la confection, le soudage, le collage, l'assemblage mécanique.

Les procédés de finition ressemblent à ceux utilisés pour les métaux ou le bois après adaptation aux polymères organiques, par exemple peinture, traitements de surface, galvanoplastie, etc.

3 • MOULAGE PAR INJECTION DES THERMOPLASTIQUES

3.1 Principe

Une presse à injecter les thermoplastiques, dite également presse d'injection haute pression, comporte essentiellement trois parties principales (figure 3.1) assurant trois fonctions fondamentales :

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

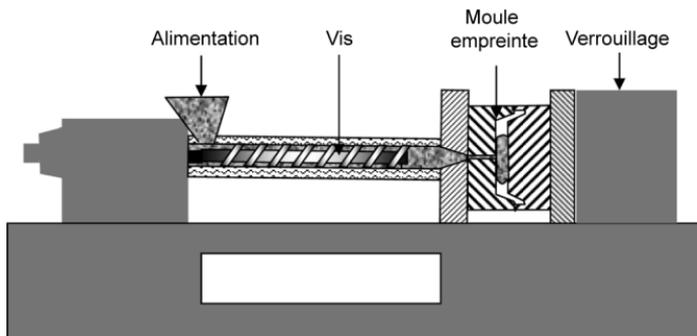


Figure 3.1 – Principe de l'injection haute pression.

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

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

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

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

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

1. plastification : dans cette première phase, l'extrémité du fourreau est obturée par la buse et la vis tourne en reculant pour accumuler en tête de vis le polymère plastifié et chaud ;
2. remplissage : lorsque la quantité voulue de la résine nécessaire à l'injection d'une moulée est plastifiée, la buse s'ouvre et la vis fait office de piston pour injecter sous haute pression et à grande vitesse le polymère dans le moule fermé refroidi à une température nettement inférieure à celle de la résine injectée ;

3. compactage : en se refroidissant dans le moule, le polymère se contracte, ce que l'on compense partiellement en maintenant la pression pendant que l'on continue à injecter du polymère fondu. Le processus cesse lorsque la matière contenue dans le canal d'alimentation reliant la buse de la presse à injecter au moule est solidifiée ;

4. refroidissement et maintien : le refroidissement du polymère, lent en raison de sa faible conductivité thermique, est poursuivi jusqu'à une consolidation physique suffisante de la pièce ;

5. éjection : l'opération de démoulage est manuelle ou plus souvent automatisée. Pour des raisons économiques, l'éjection intervient le plus rapidement possible, dès que la pièce est manipulable sans déformation, et le refroidissement complet n'est obtenu qu'après la sortie du moule.

Certaines phases du cycle d'injection sont partiellement imbriquées, par exemple le compactage et le refroidissement, la plastification de la moulée suivante et le refroidissement de la moulée en cours.

Pratiquement tous les thermoplastiques, sauf le PTFE et le PBI, sont injectables, dans des conditions de températures et de pression différentes. Les résines chargées de fibres de longueurs limitées ou allégées sont utilisables.

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

3.2 Les systèmes d'injection

Les systèmes d'injection comprennent la vis, le dispositif de chauffage, le dispositif d'injection dans le moule.

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

Le tableau 3.1 présente quelques exemples de presses d'usage courant montrant les différences importantes de caractéristiques pour une même capacité théorique d'injection. Ces chiffres sont purement indicatifs et ne peuvent se substituer à ceux des constructeurs. D'une façon générale, pour des capacités théoriques d'injection croissantes, les diamètres de vis, les capacités de plastification, les vitesses d'injection, les puissances de chauffage et les puissances totales installées croissent. Pour les exemples recensés, les vis ont toujours un rapport L/D élevé, de 13 à 27, alors que les pressions d'injection sont toujours supérieures à 1 000 bar. Bien que portant sur plus de 35 modèles, ces exemples sont loin d'être exhaustifs et des caractéristiques très différentes peuvent être rencontrées. Il importe de faire un tour complet du marché avant de faire le choix de la meilleure solution pour satisfaire son cas particulier ou couvrir le maximum de possibilités prévisibles.

Tableau 3.1 – Exemples de presses d'usage courant.

Volume injectable (cm³)	19	25	38	47	49	70	77	88	100
Diamètre de la vis (mm)	16	18	22	25	25	30	32	30	32
Pression d'injection (bar)	2 200	3 030	2 030	1 370	1 570	1 090	1 610	1 350	2 260
Rapport (L/D)	20	21	17	20	15	14	20	20	20
Vitesse de la vis maximale (tr/min)	450	630	420			330	600	400	300
Capacité de plastification (g/s)	4	4,5	6	10	7	8	15	15	15
Course de buse (mm)	510	150	150		150	150	510	200	
Force d'appui de buse (kN)	25	30	30	50	30	28	57	60	57
Course de la vis (mm)	510	100	100		100	100		125	100
Vitesse d'injection (g/s)	90	38	57	220	74	107	360	280	362

Tableau 3.1 – Exemples de presses d'usage courant. (suite)

Volume injectable (cm³)	116	143	155	163	170	220	235	280	280
Diamètre de la vis (mm)	32	32	40	34	38	40	40	45	45
Pression d'injection (bar)	2 240	2 100	1 450	1 700	1 590	1 350	1 710	2 100	1 350
Rapport L/D	25	22	20	20	21	20	20	22	18
Vitesse de la vis maximale (tr/min)	550	320	300	550	320	320	320	320	320
Capacité de plastification (g/s)	27	15	30	45	20	26	28	28	37
Course de buse (mm)	290			290	290		48		
Force d'appui de buse (kN)	43	37	57	43	43	37	122	48	59
Course de la vis (mm)	144			144	144				
Vitesse d'injection (g/s)	540	94	2 100	758	122	155		155	155

Tableau 3.1 – Exemples de presses d'usage courant. (suite)

Volume injectable (cm³)	360	400	480	640	720	850	915	946
Diamètre de la vis (mm)	45	55	52	52	62	60	70	65
Pression d'injection (bar)	1 700	3 400	1 350	2 200	2 670	1 700	2 100	2 110
Rapport L/D	20	23	20	23	25	20	23	25
Vitesse de la vis maximale (tr/min)	320	525	320	250	570	250	570	180
Capacité de plastification (g/s)	40		50	45		54		57
Force d'appui de buse (kN)	59	88	66	59	88	59	88	
Vitesse d'injection (g/s)	163	2 250	220	190	2 870	250	368	730

Tableau 3.1 – Exemples de presses d'usage courant. (suite)

Volume injectable (cm³)	1 033	1 097	1 150	1 259	1 350	1 350	1 433	1 535	1 540
Diamètre de la vis (mm)	70	70	70	75	70	80	80	80	80
Pression d'injection (bar)	2 740	1 820	1 300	1 580	2 100	2 100	1 390	1 300	2 660
Rapport L/D	25	23	20	21	20	23	20	18	24
Vitesse de la vis maximale (tr/min)	520	200	250	200	210	420	200	250	340
Capacité de plastification (g/s)		77	63	90	63		105	72	
Course de buse (mm)		470		470			470		720
Force d'appui de buse (kN)	119	82	59	82	121	119	82	76	119
Course de la vis (mm)		285		285			285		
Vitesse d'injection (g/s)	3 270	845	340	970	350	4 270	1 104	440	3 500

Tableau 3.1 – Exemples de presses d'usage courant. (suite)

Volume injectable (cm³)	1 760	1 952	2 010	2 196	2 225	2 410	2 700	2 900
Diamètre de la vis (mm)	80	90	80	90	90	100	100	95
Pression d'injection (bar)	1 620	2 660	2 100	2 590	1 300	1 700	2 100	1 850
Rapport L/D	20	22	20	27	18	27	24	
Vitesse de la vis maximale (tr/min)	210	340	175	340	210	340	340	
Capacité de plastification (g/s)	81		81		90			420

Tableau 3.1 – Exemples de presses d'usage courant. (suite)

Course de buse (mm)		720		720		720	720	
Force d'appui de buse (kN)	120	120	120	120	120	120	120	
Vitesse d'injection (g/s)	450	4 450	400	4 450	560	5 500	6 650	

Tableau 3.1 – Exemples de presses d'usage courant. (suite)

Volume injectable (cm³)	3 135	3 180	3 280	3 925	4 750	5 800	6 900	8 000	9 700
Diamètre de la vis (mm)	100	90	110	100	110	110	120	130	140
Pression d'injection (bar)	1 300	2 000	1 730	1 670	1 400	2 070	1 740	1 480	1 370
Rapport L/D	18	20	22	20	22	24	25	20-25	
Vitesse de la vis maximale (tr/min)	175	145	340	145	145	200	200	150	
Capacité de plastification (g/s)	100	90		112	147				500
Course de buse (mm)			720			1 200	1 200	1 200	
Force d'appui de buse (kN)	120	120	120	120	120	120	120	120	
Course de la vis (mm)						610	610	610	
Vitesse d'injection (g/s)	610		6 650			1 900	2 260	2 650	

Tableau 3.1 – Exemples de presses d'usage courant. (suite)

Volume injectable (cm³)	10 800	14 200	16 200	20 500
Diamètre de la vis (mm)	140	160	160	180
Pression d'injection (bar)	1 700	1 300	1 700	1 370
Capacité de plastification (g/s)	190	190	230	200

Le tableau 3.2 indique des facteurs de conversion théoriques permettant de calculer la capacité approximative d'injection en grammes du polymère considéré à partir des volumes théoriques d'injection (cm^3). Les valeurs réelles doivent être déterminées expérimentalement en fonction des paramètres réels utilisés.

Tableau 3.2 – Conversion des capacités d'injection (cm^3) en poids (g) maximal injecté.

Polymère	Facteur de conversion (g/cm^3)
ABS	0,88
CA	1,02
CAB	0,97
PA	0,91
PC	0,97
PE	0,71
PMMA	0,94
POM	1,15
PP	0,73
PP + 20 % Talc	0,85
PP + 40 % Talc	0,98
PP ignifugé	0,85
PS	0,91
PVC-U	1,12
PVC-P	1,02
SAN	0,88

Comme on pouvait s'y attendre, la figure 3.2 confirme l'augmentation régulière du diamètre de la vis en fonction de la capacité d'injection avec une faible amplitude de variation pour un volume injectable donné.

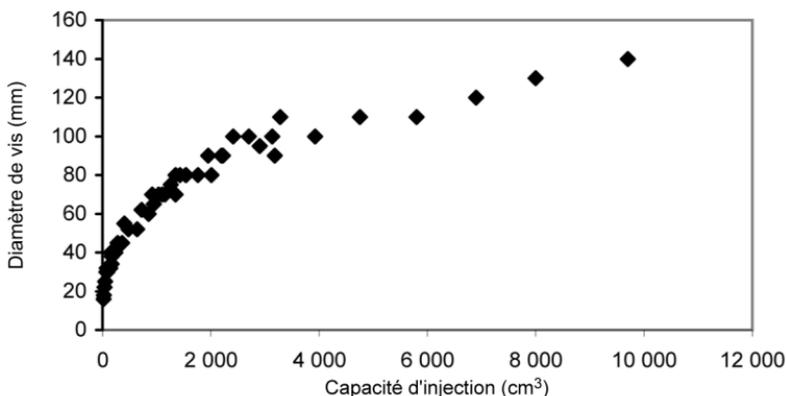


Figure 3.2 – Diamètre de vis (mm) en fonction de la capacité d'injection (cm³).

La figure 3.3 montre une augmentation générale de la capacité de plastification en fonction du volume injectable mais, mis à part un point très particulier, ne montre pas de différences importantes pour une capacité d'injection donnée.

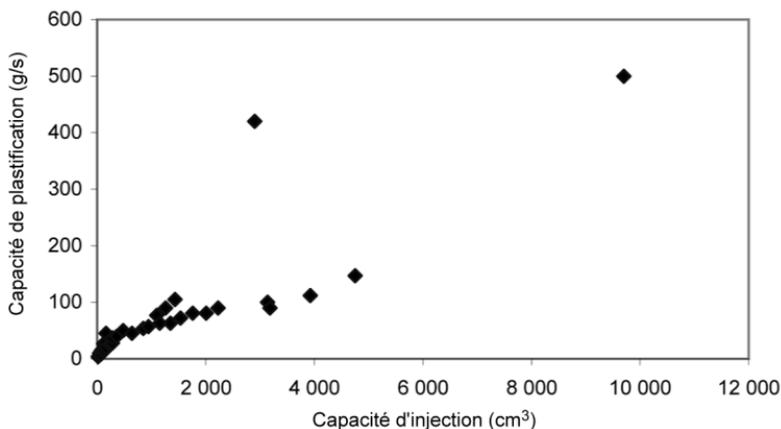


Figure 3.3 – Capacité de plastification (g/s) en fonction de la capacité d'injection (cm³).

La figure 3.4, par contre, fait ressortir des différences importantes de vitesse d'injection, mettant en évidence des politiques de conception différentes.

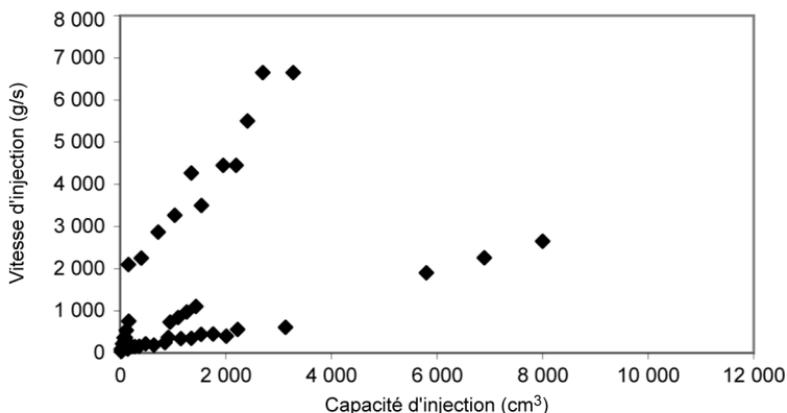


Figure 3.4 – Vitesse d'injection (g/s) en fonction de la capacité d'injection.

La figure 3.5 étudie l'évolution du ratio capacité théorique de plastification/capacité théorique d'injection, montrant une évolution régulière avec juste un point particulier.

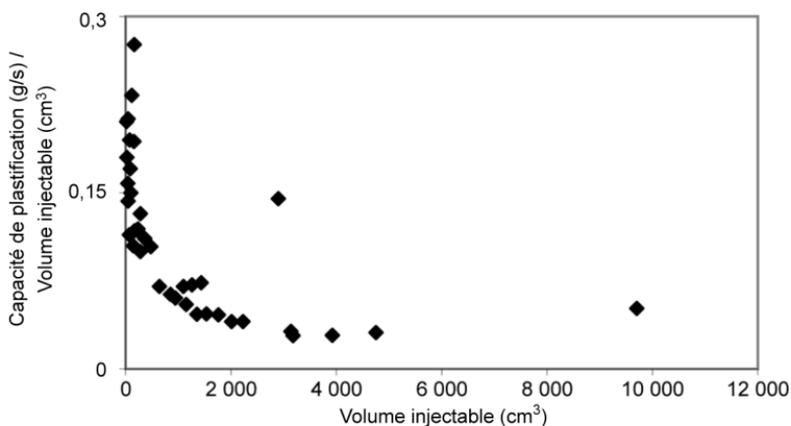


Figure 3.5 – Ratio capacité de plastification (g/s) / volume injectable (cm³) en fonction du volume injectable (cm³).

La figure 3.6 montre la large plage d'évolution du ratio vitesse maximale d'injection/capacité théorique d'injection, confirmant l'existence de conceptions différentes.

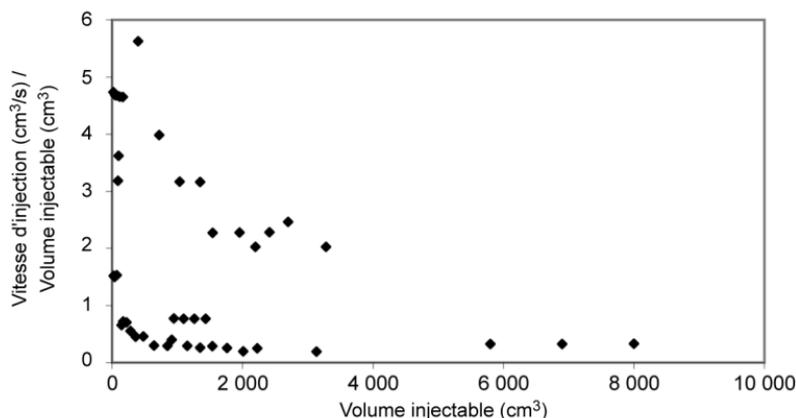


Figure 3.6 – Ratio vitesse d'injection (cm³/s) / volume injectable (cm³) en fonction du volume injectable (cm³).

La puissance de chauffe augmente régulièrement avec le volume maximal injectable (tableau 3.3). Elle doit être adaptée, ainsi que la conception de la presse aux températures d'injection des polymères, qui peuvent varier de 150 à 400 °C ou plus, entraînant des problèmes de dilatation et de comportement thermique très différents. À titre purement indicatif, le tableau 3.4 donne quelques exemples de ces températures classées par ordre croissant. Ces chiffres ne peuvent absolument pas se substituer à ceux des producteurs et fournisseurs de polymères et compounds.

Tableau 3.3 – Exemples de puissance de chauffe et de puissance totale installée.

Volume injectable (cm ³)	25	38	49	70	88	116	143	163
Puissance de chauffe (kW)	6	6	5-9	6-8	6-8	8-17	8	10
Volume injectable (cm ³)	220	235	280	360	480	640	850	1 150
Puissance de chauffe (kW)	9	9	9-12	12	20	25	25	27

Tableau 3.3 – Exemples de puissance de chauffe et de puissance totale installée. (suite)

Volume injectable (cm³)	946	1 097	1 259	1 350	1 433	1 535	1 760	2 010
Puissance de chauffe (kW)	28	28	28	27	28	27	31	31
Volume injectable (cm³)	2 225	2 540	3 180	3 925	4 750	5 800	6 900	8 000
Puissance de chauffe (kW)	31	34	37	37	43	79	91	79-107

Tableau 3.4 – Exemples de températures d'injection.

Température (°C)	Abréviation	Polymère
Polymères purs et alliages		
120-200	E/VAC ou EVA	Éthylène/acétate de polyvinyle
140-190	PVC-P	Polychlorure de vinyle souple
150-260	PE-BD	Polyéthylène basse densité
150-260	PE-LLD	Polyéthylène basse densité linéaire
160-220	SBS	Styrène butadiène styrène
160-280	PS	Polystyrène
160-300	PE-HD	Polyéthylène haute densité
170-200	PVC	Polychlorure de vinyle rigide
170-230	CAB	Acéto-butyrates de cellulose
170-240	CP	Propionate de cellulose
170-250	CA	Acétate de cellulose
170-250	PEBA	Polyéther bloc amide
180-250	TPU	Polyuréthane thermoplastique
180-280	TPEE ou COPE	Élastomère polyester thermoplastique
180-290	PMMA	Polyméthacrylate de méthyle

Tableau 3.4 – Exemples de températures d'injection. (suite)

Température (°C)	Abréviation	Polymère
Polymères purs et alliages		
190-210	ABS + PVC	Alliage ABS + PVC
190-220	POM-Co	Polyoxyméthylène copolymère
190-220	POM-Ho	Polyoxyméthylène homopolymère
190-230	PS + PMMA	Alliage PS + PMMA
190-260	SAN	Styrène acrylonitrile
190-270	PP-Co	Polypropylène copolymère
190-280	ABS	Acrylonitrile butadiène styrène
190-280	SB	Styrène butadiène (PS choc)
200-270	PA11 ou PA12	Polyamide 11 ou 12
200-290	PP-H	Polypropylène homopolymère
210-260	PVDF	Polyfluorure de vinylidène
220-280	ABS + PC	Alliage ABS + PC
230-260	MABS	Méthacrylate/ABS
230-265	SMA	Styrène/anhydride maléique
230-270	PA6	Polyamide 6
230-270	PBT	Polybuthylène téréphtalate
230-290	PA6-12	Polyamide 6-12
230-290	PMP	Polyméthyl pentène
240-260	PMMA + PC	Alliage PMMA + PC
240-280	ABS + PA6	Alliage ABS + PA6
240-280	ASA	Acrylonitrile styrène acrylique

Tableau 3.4 – Exemples de températures d'injection. (suite)

Température (°C)	Abréviation	Polymère
Polymères purs et alliages		
240-280	E/MAA	Éthylène/acide méthacrylique (ionomère)
240-280	PP + PA6	Alliage PP + PA 6
250-280	PC + PBT	Alliage PC + PBT
250-320	PET	Polyéthylène téréphtalate
260-300	ASA + PC	Alliage ASA + PC
260-300	PAMXD6	Polyarylamide
260-300	PPE	Polyphénylène éther
260-310	COC	Copolymère d'oléfines cycliques
260-315	PET + PC	Alliage PET + PC
270-300	PA66	Polyamide 6-6
280-320	E/TFE	Éthylène/tétrafluoroéthylène
280-320	PA6-3T	Polyamide 6-3 - acide téréphtalique
280-330	PC	Polycarbonate
290-320	PPE + PA	Alliage PPE + PA
290-350	LCP	Polymère à cristaux liquides
300-340	PA66T	PA6 - acide téréphtalique
310-400	PES	Polyéthersulfones
310-400	PSU	Polysulfones
330-400	FEP	Fluoroéthylènepropylène
340-370	PPC	Polyphtalate carbonate
340-430	PEI	Polyétherimide
350-390	PEEK	Polyéther éther cétone

Tableau 3.4 – Exemples de températures d'injection. (suite)

Température (°C)	Abréviation	Polymère
Polymères purs et alliages		
370-430	PFA	Perfluoroalkoxy
380-420	PI TP	Polyimide thermoplastique
Polymères renforcés fibres de verre		
195-215	POM-GF 30	Polyoxyméthylène 30 % fibres de verre
240-320	PP-GF 30	Polypropylène 30 % fibres de verre
240-280	ABS + PBT GF 20	Alliage ABS + PBT 20 % fibres de verre
250-270	PBT-GF 30	Polybutylène téréphtalate 30 % fibres de verre
260-300	PAMXD6-GF 30	Polyarylamide 30 % fibres de verre
260-300	PET + PBT GF 30	Alliage PET + PBT 30 % fibres de verre
270-320	PET-GF 30	Polyéthylène téréphtalate 30 % fibres de verre
270-330	SPS GF 15	Polystyrène syndiotactique 15 % fibres de verre
290-310	PA66-GF 50	Polyamide 6-6 50 % fibres de verre
290-310	PA66-GF 30	Polyamide 6-6 30 % fibres de verre
290-330	PPE-GF 30	Polyphénylène éther 30 % fibres de verre
290-350	LCP-GF 40	Polymère à cristaux liquides 40 % fibres de verre
295-310	PCT-GF 30	Polytéréphtalate de cyclohexanol diméthylène 30 % fibres de verre
320-340	PPA-GF 30	Polyphthalamide 30 % fibres de verre
320-370	PPS-GF 40	Polysulfure de phénylène 40 % fibres de verre
330-370	PAI-GF 30	Polyamide imide 30 % fibres de verre
350-400	PSU-GF 30	Polysulfones 30 % fibres de verre

La buse de la presse doit assurer l'étanchéité du système d'injection et du moule durant l'injection. La force d'appui buse/moule doit être suffisante et s'exercer sur une surface de contact aussi réduite que possible avec le moule pour limiter son refroidissement. Pour les buses longues, il peut être nécessaire de prévoir un chauffage spécifique.

Le clapet est plaqué sur son siège lorsque le vérin d'injection pousse la vis pour injecter la matière dans le moule, empêchant tout reflux de matière vers l'arrière

3.3 Les moules et systèmes de fermeture

Les moules sont constitués de blocs métalliques suffisamment rigides comprenant une ou des cavités (ou empreintes) reproduisant la forme de la ou des pièces à obtenir, à quelques corrections dimensionnelles près, dues aux phénomènes de dilatation thermique, retrait, relaxation de contraintes, etc. L'ensemble recevant la résine sous haute pression doit être soigneusement étudié pour éviter les fuites et autres bavures mais aussi les coincements et déformations. Bien évidemment, le moule doit permettre le démoulage des pièces sans dommages ni pour elles ni pour le moule.

Les fonctions principales à assurer sont, dans un ordre chronologique :

- l'alimentation en résine des empreintes dans un état rhéologique et thermique convenable ;
- la mise en forme de l'objet moulé dans le respect des spécifications dimensionnelles voulues ;
- le refroidissement suffisant du thermoplastique pour pouvoir être démoulé et manipulé sans nuire à sa forme ni à ses cotes ;
- l'extraction des pièces moulées sans déformation ni dégradation.

Le moule est schématiquement constitué :

- d'une carcasse et d'un ensemble structural assurant la résistance mécanique : plaques de fixation avant et arrière, plaques porte empreintes, plaques intermédiaires... ;
- d'une ou plusieurs empreintes. Leur nombre doit être soigneusement étudié en fonction de la pièce, du polymère et de la presse qui sera réellement utilisée. Il faut, en général, prévoir le nombre maximal d'empreintes qui peuvent être alimentées par l'unité d'injection tout en assurant la fermeture correcte du moule et en vérifiant que les séries à fabriquer justifient l'augmentation du coût du moule provenant de la multiplication du nombre d'empreintes. Pour les objets creux ou comportant des ouvertures,

- le moule peut inclure un ou plusieurs noyaux pour les parties creuses de la pièce et des poinçons créant des ouvertures dans ses parois ;
- d'un ensemble d'alimentation : contre-buse, canaux, seuils... Les objectifs de réduction des déchets ont amené à l'utilisation de canaux chauds en blocs chauds portés à la température de transformation, ce qui empêche la solidification du polymère. On évite ainsi la formation des carottes dont le recyclage est onéreux. En contrepartie, le moule est plus complexe et donc d'un prix plus élevé ;
 - d'un système de guidage assurant le positionnement correct des diverses parties pendant tout le cycle de fonctionnement : colonnes de guidage, bagues de centrage... ;
 - d'un système de refroidissement (canaux de circulation, régulateur-circulateur de liquide de refroidissement...) assurant la consolidation physique des pièces par reprise d'un module de rigidité suffisant ;
 - d'un système de démoulage : éjecteurs, plaque d'éjection, rappel d'éjection, queue d'éjection, arrache-carotte...

Des inserts peuvent être placés dans le moule juste avant l'injection et ne font donc pas partie intégrante du moule mais leur système de positionnement et de maintien doit être prévu lors de la conception et de la construction du moule. Le moule est souvent très complexe et représente un investissement important qui ne peut être amorti que sur la série de pièces pour laquelle il a été étudié. Des logiciels sont spécialement dédiés à leur conception et les constructions modulaires permettent quelques économies.

Le refroidissement du moule et des pièces doit réaliser un équilibre délicat entre minimisation du temps de refroidissement, consolidation physique de la pièce pour autoriser le démoulage sans créer de contraintes internes nuisibles à la stabilité dimensionnelle et à la pérennité des pièces.

Des régulateurs-circulateurs de fluides, à cuves ouvertes ou fermées, permettent l'obtention des températures adéquates dont le tableau 3.5 présente, à titre purement indicatif, quelques exemples en fonction de la nature du polymère. D'autres températures peuvent être trouvées par ailleurs en fonction des cas particuliers rencontrés.

Tableau 3.5 – Exemples de températures de moulage et démoulage.

Sigle	Température du moule (°C)	Température de démoulage (°C)
ABS	30-80	70-100
ABS + PA6	70-80	100
ABS + PBT 20 % fibres de verre	80-100	150
ABS + PC	60-100	120
ASA	40-80	100
ASA + PC	60-90	100
CA	40-65	60
CAB	20-70	80
COC	50-110	130
CP	20-60	80
E/TFE	80-150	180
E/VAC ou EVA	5-50	70
LCP	80-110	240
LCP 40 % fibres de verre	90-110	240
MABS	50-80	100
PA6	60-100	140-180
PA6-3T	60-120	150
PA66	60-110	180-210
PA66 30 % fibres de verre	80-120	180-210
PA66 50 % fibres de verre	80-140	180-210
PA6-12	40-95	120-130
PA11 ou PA12	40-80	100-130
PAI 30 % fibres de verre	110-180	240
PAMXD6	80-140	230
PAMXD6 30 % fibres de verre	100-140	200

Tableau 3.5 – Exemples de températures de moulage et démoulage. (suite)

Sigle	Température du moule (°C)	Température de démoulage (°C)
PBT	40-120	170
PBT 30 % fibres de verre	80-120	170
PC	70-120	130
PC + PBT	80-100	140
PI TP	180-230	250
PE-HD	4-60	80-110
PE-BD	4-60	60-95
PE-LLD	4-60	60-95
PEEK	160-190	300
PEI	140-160	180
PES	100-160	200
PET	20-140	170
PET 30 % fibres de verre	80-100	170
PET + PBT 30 % fibres de verre	40-80	170
PET + PC	40-85	90-110
PMMA	40-80	70-90
PMMA + PC	60-100	130
PMP	40-90	150
POM-Co	60-120	100-140
POM-Ho	60-130	100-150
POM 30 % fibres de verre	60-130	100-150
PP-Co	4-80	90-110
PP-Ho	4-90	110-130
PP 30 % fibres de verre	4-80	110-130
PP + PA6	20-60	80

Tableau 3.5 – Exemples de températures de moulage et démoulage. (suite)

Sigle	Température du moule (°C)	Température de démoulage (°C)
PPA 30 % fibres de verre	150-180	190
PPE	60-110	120
PPE 30 % fibres de verre	70-120	170
PPE + PA	70-120	140
PPS 40 % fibres de verre	110-170	190-230
PS	4-60	60-85
PS + PMMA	20-70	100
PSU	100-160	190
PSU 30 % fibres de verre	130-170	190
PVC	40-60	70
PVC plastifié	20-60	60
PVDF	70-90	160
SAN	30-60	80-90
S/B	4-60	65-80
SBS	10-50	60-80
SMA	20-70	95
PEBA	20-40	55
TPEE ou COPE	10-40	90
TPU	5-40	50-70

Le *système de fermeture*, qui peut être mécanique, hydraulique, électrique, mixte mécanique-hydraulique, permet la fermeture et le verrouillage des parties mobiles et fixes du moule.

Les fermetures mécaniques assurent le verrouillage par des genouillères mécaniques actionnées par un vérin hydraulique.

Les fermetures hydrauliques utilisent un vérin central de grand diamètre pour assurer l'approche des parties mobiles et fixes puis un vérin plus petit assure le verrouillage final.

Les fermetures électriques, technique la plus récente, utilisent un système électrique permettant d'éliminer totalement l'hydraulique dans la conception de la presse. Les avantages mis en avant par les adeptes de ce procédé concernent les coûts de production plus faibles, une bonne précision, une reproductibilité accrue, des temps de cycle optimisés, des gains sur la consommation énergétique.

Les fermetures mixtes combinent les deux procédés, mécanique et hydraulique, les mouvements d'ouverture et de fermeture se faisant par des genouillères alors que le verrouillage est assuré par un ou des vérins hydrauliques.

Une caractéristique importante du système de fermeture est la *force de fermeture*, qui doit être supérieure à la force exercée sur le moule par la résine injectée sous haute pression sous peine de voir s'ouvrir le moule pendant la phase de remplissage. Ceci conduit à des caractéristiques dimensionnelles hors spécifications, des bavures, des pertes de matière, des difficultés de démoulage et très souvent la mise au rebut des pièces.

Parmi les autres caractéristiques importantes d'un point de vue pratique, citons les principales :

- la course de fermeture et d'ouverture, qui conditionne la profondeur maximale des pièces moulables ;
- le passage entre colonnes, qui détermine les cotes maximales des moules à moins de prévoir une colonne démontable ;
- les dimensions de plateaux, qui conditionnent les cotes maximales des moules ;
- les épaisseurs minimales et maximales admissibles pour les moules.

En général, chez un même constructeur, le même système de fermeture peut recevoir un choix parmi plusieurs unités d'injection et, réciproquement, une même unité d'injection peut être montée sur un choix parmi plusieurs unités de fermeture.

Le tableau 3.6 propose quelques exemples de caractéristiques d'unités de fermeture.

Tableau 3.6 – Exemples de caractéristiques d'unités de fermeture.

Force de fermeture (kN)	340-350	450	540	600	830
Distance entre colonnes (mm)	270 × 310	320 × 320	360 × 310	420 × 420	410 × 360
Dimension des plateaux	470 × 280		520 × 470		580 × 530
Hauteur du moule (mm)	150-250	195	160-370	> 325	180-410
Course d'ouverture (mm)	200-360	375	630	450	710
Force d'ouverture (kN)	29,5	26		35	
Passage entre plateaux (mm)	450	570		775	
Force d'éjection (kN)	26	26	70	26	
Course d'éjection (mm)	50-100	100		150	80
Cycle à vide (s)	1,3	1,4		1,5	
Poids maximal du moule mobile (kg)	200				
Diamètre de vis des unités d'injection adaptables (mm)	18 ; 22 ; 25 ; 30	14 ; 18 ; 22 ; 25 ; 30	16 ; 18 ; 20 ; 22 ; 25 ; 28 ; 32	14 ; 18 ; 22 ; 25 ; 30 ; 35 ; 40	20 ; 22 ; 25 ; 28 ; 32 ; 35 ; 40

Tableau 3.6 – Exemples de caractéristiques d'unités de fermeture. (suite)

Force de fermeture (kN)	1 100	1 300-1 370	1 600	1 800	2 100
Distance entre colonnes (mm)	470 × 420	450 × 530	510 × 450	570 × 520	570 × 610
Dimension des plateaux		660 × 780	780 × 730		
Hauteur du moule (mm)	275	200-550	170-550	325	200-630
Course d'ouverture (mm)	400	400-850		650	
Force d'ouverture (kN)	55			84	
Passage entre plateaux (mm)	775	650-950		975	
Force d'éjection (kN)	41	40	45	41	45
Course d'éjection (mm)	150	100-175	200	200	225
Cycle à vide (s)	2,2	1,1	1,3	2,6	1,5
Poids maximal du moule mobile (kg)		1 000			
Diamètre de vis des unités d'injection adaptables (mm)	18 ; 22 ; 25 ; 30 ; 35 ; 40 ; 50	25 ; 28 ; 32 ; 35 ; 40 ; 45	35 ; 40 ; 45 ; 52 ; 60	20 ; 22 ; 25 ; 28 ; 32 ; 36 ; 40	40 ; 45 ; 52 ; 60 ; 70

Tableau 3.6 – Exemples de caractéristiques d'unités de fermeture. (suite)

Force de fermeture (kN)	2 400	3 000	4 000	5 000	5 400-5 600
Distance entre colonnes (mm)	630 × 630	710 × 710	900 × 710	1 000 × 800	800 × 960
Dimension des plateaux (mm)					1 260 × 1 320
Hauteur du moule (mm)	350	375	400	450	400-850
Course d'ouverture (mm)	725	800	975	1 150	1 700
Force d'ouverture (kN)	104	141	175	247	
Passage entre plateaux	1 075	1 175	1 375	1 600	
Force d'éjection (kN)	59	59	81	81	114
Course d'éjection (mm)	200	200	250	250	180-300
Cycle à vide (s)	2,7	2,8	3,2	3,6	2,4
Poids maximal du moule mobile (kg)	1 000	1 500			
Diamètre de vis des unités d'injection adaptables (mm)	35 ; 40 ; 45 ; 50 ; 55 ; 65	45 ; 50 ; 55 ; 65 ; 75	55 ; 65 ; 75 ; 85	55 ; 65 ; 75 ; 85 ; 95	66 ; 76 ; 84 ; 92 ; 100

Tableau 3.6 – Exemples de caractéristiques d'unités de fermeture. (suite)

Force de fermeture (kN)	6 500	12 700	15 700	24 500	29 400	34 300
Distance entre colonnes (mm)	1 100 × 800	1 325 × 1 280	1 800 × 1 500	1 800 × 1 600	1 900 × 1 800	1 900 × 1 800
Hauteur du moule (mm)	500					
Course d'ouverture (mm)	1 250	1 300-1 800	1 700-2 400	1 800-2 600	1 800-2 700	1 300-1 800
Force d'ouverture (kN)	247					
Passage entre plateaux	1 750	2 000-2 500	2 500-3 200	2 700-3 500	2 800-3 700	2 800-3 700
Force d'éjection (kN)	81					
Course d'éjection (mm)	250					
Cycle à vide (s)	4,5					
Diamètre de vis des unités d'injection adaptables (mm)	65 ; 75 ; 85 ; 95	115 ; 125	125 ; 140	140 ; 160	160 ; 180	160 ; 180

3.4 Les presses à injection

3.4.1 Presses standards

La presse complète (figures 3.7 et 3.8 : exemples de presses KraussMaffei) comporte les systèmes d'injection et de fermeture adaptés aux pièces à produire et aux polymères utilisés de façon à satisfaire les contraintes techniques dans des conditions économiques acceptables.

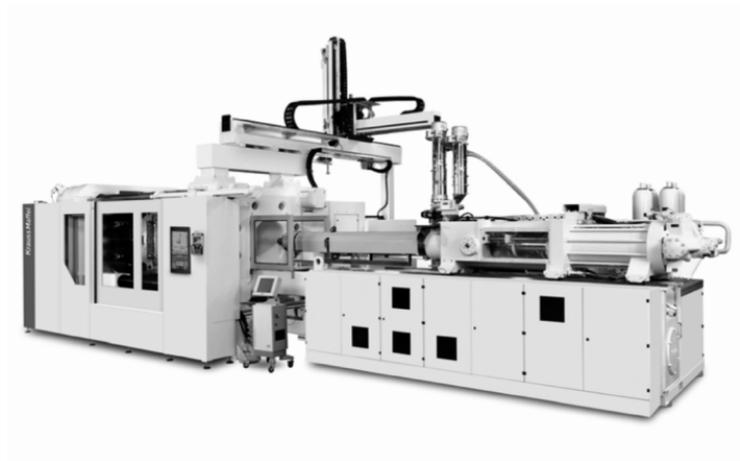


Figure 3.7 – Presse KraussMaffei de forte puissance
(avec l'aimable autorisation de KraussMaffei).



Figure 3.8 – Petite presse KraussMaffei
(avec l'aimable autorisation de KraussMaffei).

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

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

Tableau 3.7 – Exemples de forces de fermeture (kN), diamètres de vis (mm) et puissances installées (kW).

Force (kN)	Diamètre de vis (mm)																				
	18	22	25	30	32	34	40	45	52	60	70	75	80	90	100	110	115	120	140	180	
350																					
450																					
540																					
600																					
830																					
1 100																					
1 300																					
1 600																					
1 800																					
2 100																					
2 400																					
3 000																					

Tableau 3.7 – Exemples de forces de fermeture (kN), diamètres de vis (mm) et puissances installées (kW). (suite)

Force (kN)	Diamètre de vis (mm)																				
	18	22	25	30	32	34	40	45	52	60	70	75	80	90	100	110	115	120	140	180	
4 000									■	■	■	■	■	■							
5 000								■	■	■	■	■	■	■							
5 500										■	■	■	■	■	■						
6 500										■	■	■	■	■	■						
12 700																■	■	■			
15 700																	■	■	■		
24 500																				■	■
29 400																					■
34 300																					■
	Puissance installée																				
Puis- sance (kW)	16	16	16	16	22	25	25	25	39	56	58	65	65	77	90	118	210	210	220		
	30	30	30	30	30	25	25	30	56	65	65	87	112	112	112	112	210	210	220		

Les presses sont souvent équipées avec des systèmes de conduite automatisée et d'acquisition de données.

Le tableau 3.8 indique quelques constructeurs ou distributeurs de matériel.

Tableau 3.8 – Exemples de constructeurs ou distributeurs de matériel.

Société	Site Internet
Arburg	www.arburg.com
Battenfeld	www.battenfeld-imt.com .
Battenfeld-Gloucester	www.cms.battenfeld.com
Billion	www.billion.fr
Boy	www.drboy.de
Coperion	www.coperion.com
Demag	www.sumitomo-demag.com
Engel	www.engelglobal.com
Fanuc	www.fanuc.de
Farpi-France	www.farpi.fr
Ferromatik Milacron	www.ferromatik.com
HW.Tech	www.hwtech.de
Husky	www.husky.ca
JSW	www.farpi.fr
KraussMaffei Berstorff	www.kraussmaffe.com
Mitsubishi	www.mhiinj.com
Negri Bossi	www.negribossi.com
Netstal	www.netstal.com
Nissei	www.nisseijushi.co.jp et www.nisseiamerica.com
Sandretto	www.sandretto.fr
SDT Sodick PlusTech	en.plustech.co.jp

Tableau 3.8 – Exemples de constructeurs ou distributeurs de matériel. (suite)

Société	Site Internet
Stork	www.storkspm.com
Stork Reed	www.storkspm.com
Sumitomo	www.sumitomopm.com et www.shi.co.jp/plastics
Sumitomo Demag	www.sumitomo-demag.com
Toshiba	www.toshiba-machine.co.jp
Windsor	www.farpi.fr

3.4.2 Presses à injection spéciales

Il existe de nombreuses variantes des presses à injection par la disposition des composants, la forme des bâtis, les conceptions des unités de plastification, les principes de plastification/dosage, la nature des matériaux injectables, l'importance des pièces à produire (de la micro-pièce à la pièce géante), du nombre de matières composant la pièce finale, etc. Nous n'examinerons que quelques-unes des possibilités.

Outre la réduction de l'encombrement au sol, les *presses verticales* facilitent le moulage de pièces avec inserts mais la hauteur peut être gênante pour l'alimentation et l'automatisation de l'éjection.

Les *presses sans colonne* facilitent les accès aux moules ainsi que l'utilisation de dispositifs annexes pour le changement de moules et l'automatisation en raison des dégagements dus à la suppression des colonnes.

Sur les *presses à vis et piston*, la séparation des fonctions de plastification et de dosage peut améliorer la précision des dosages.

Les *conceptions de vis*, longueurs totales, diamètres, rapports L/D , profondeurs des filets, longueurs respectives des sections d'alimentation, compression et dosage, métaux et traitements des vis et fourreaux doivent être adaptés aux polymères, charges, renforts et procédés utilisés. Par exemple, pour des vis longues, les longueurs des sections d'alimentation, compression et dosage peuvent être respectivement de $6D$, $6D$ et $5D$ pour une vis d'usage général ou $12D$, $2D$ et $6D$ pour un polymère particulier. Les métaux et traitements

peuvent également varier suivant la corrosivité du polymère, la nature de la charge ou du renfort, la tendance à coller. Par exemple, il peut être proposé :

- une vis standard pour les polyéthylènes, polypropylènes, polystyrènes et les élastomères thermoplastiques polyoléfiniques ;
- un autre type de vis avec un métal différent pour les compounds de PVC ;
- un troisième type pour les thermoplastiques d'ingénierie peu chargés ou peu renforcés, par exemple polyamides et polyesters chargés à 10 % au maximum ;
- un quatrième type pour les thermoplastiques hautes performances tels que polymères à cristaux liquides, polyétherimides, PPS, polyacétals, ABS, thermoplastiques adhérents, polycarbonates ;
- un cinquième type pour les fluoropolymères tels que PFA, PVDF, etc.

■ La micro-injection

Avec un taux de croissance à deux chiffres, les microtechnologies pénètrent de nombreux secteurs industriels tels que la mécanique de précision, le médical, l'horlogerie, les télécommunications, les biotechnologies et l'automobile. Dans tous les cas, l'objectif est de concentrer le maximum de fonctions dans un minimum d'espace pour satisfaire les impératifs techniques, économiques et environnementaux moteurs de développement. Les avantages principaux résident dans les diminutions de poids, de quantité de matière utilisée, de consommation énergétique de fabrication et d'exploitation, entraînant des réductions de coûts et de pollution. Certaines applications nécessitent la fabrication en grande série, ce qui a amené plusieurs constructeurs de presses à développer des modèles spécifiques.

Les matériels utilisés doivent conduire aux volumes d'injection inférieurs au centimètre cube tout en assurant un temps de résidence convenable, une excellente homogénéité de la masse fondue, une grande précision du dosage, la maîtrise des mouvements d'injection et une bonne répétabilité.

Ces impératifs diffèrent sensiblement de ceux des machines standards, avec notamment des forces de fermeture plus faibles, des moteurs d'entraînement de vis moins sollicités, un dosage précis des faibles quantités du domaine ou inférieures au centimètre cube.

Les techniques peuvent dériver des conceptions conventionnelles ou être plus spécifiques. Les fonctions de plastification et d'injection sont souvent dissociées. La plastification peut être assurée par une vis ou par un piston de faibles diamètres alors que l'injection et le dosage sont réalisés par un autre piston ou même une aiguille de faible diamètre. Le « tout électrique » est particulièrement adapté aux exigences de pureté et à la fabrication en salle blanche souvent associées à ce type de pièce.

Nous n'examinerons que quelques exemples :

- la technologie MicroSystem de Battenfeld utilise une vis et un piston de diamètres de 14 mm et 5 mm respectivement, autorisant une capacité d'injection inférieure à 1,1 cm³. Battenfeld a présenté un clamp vasculaire bioabsorbable de 0,4 mm de diamètre et de 0,4 mm d'épaisseur ;
- Boy a présenté des engrenages de 0,9 mg injectés dans un moule 2 empreintes sur une Boy 12A, équipée d'une vis de 12 mm ;
- Demag commercialise sa presse Microshot avec une vis spéciale de 14 mm de diamètre sur des machines standards modifiées permettant d'injecter des pièces de 0,1 à 0,5 g ;
- Engel a mis au point la technique de moulage à grande vitesse X-Melt pour injecter des pièces de 0,1 à 20 g avec des épaisseurs de parois de 0,1 à 1 mm ;
- Ferromatik Milacron a injecté des pièces de microphones en ABS pesant 0,7 g ;
- Sumitomo, avec la machine SE7M de 7 t à servomoteur, injecte des connecteurs en LCP.

Le tableau 3.9 indique quelques exemples de caractéristiques de micro-presses.

Tableau 3.9 – Exemples de caractéristiques de micro-presses.

Capacité (cm ³)	0,08-0,6	1,1	
Diamètre d'organe de plastification (mm)	10	14	14-18
Diamètre d'organe d'injection (mm)	1-3,5	5	7-11
Pression d'injection (bar)	2 000-3 500	2 500	
Vitesse de vis (tr/min)		300	
Temps de cycle à vide (s)		1,5	
Force de fermeture (kN)	4-17	50	
Dimension plateaux (mm × mm)	95 × 90	196 × 156	
Hauteur de moule (mm)	82	100	

Le tableau 3.10 indique quelques constructeurs ou distributeurs de matériel.

Tableau 3.10 – Exemples de constructeurs ou distributeurs de matériel.

Société	Site Internet
Arburg	www.arburg.com
Battenfeld	www.battenfeld-imt.com .
Boy	www.drboy.de
Demag	www.sumitomo-demag.com
Engel	www.engelglobal.com
Fanuc	www.fanuc.de
Ferromatik Milacron	www.ferromatik.com
HW.Tech	www.hwtech.de
Nissei	www.nisseijushi.co.jp et www.nisseiamerica.com
SPT Sodick Plustech	en.plustech.co.jp
Sumitomo	www.sumitomopm.com
Sumitomo Demag	www.sumitomo-demag.com

■ Les méga-presses

Il semble que les plus grosses presses livrées en 2009 aient été une Negri Bossi de type hybride de 70 000 kN de force de fermeture équipée de deux unités d'injection et une Engel 5500 Duo de 55 000 kN de force de fermeture équipée de trois unités d'injection pour la production de réservoirs de 6 500 l enterrés et de conteneurs. Les trois unités d'injection, montées en parallèle, sont dotées de vis de 260 mm permettant l'injection d'un poids maximal de 140 kg. La presse mesure 25 m de long, pèse 585 t et prend assise à 2 m sous le niveau du sol.

Dans cette même gamme de grosses presses, les forces de fermeture s'échelonnent, pour les modèles plus standards, de 6 500 à 55 000 kN, les forces d'ouverture de 400 à 1 500 kN, les temps de cycle à vide de 2,9 à 12,3 s, les ouvertures de 700 à 1 750 mm et les puissances installées de 45 à 550 kW.

3.5 Aides à la conduite des presses

Le moulage n'échappe pas aux impératifs communs à tous les processus industriels tendant à réduire les temps morts de réglage, les taux de pièces hors spécification, les déchets, etc. L'injection est tributaire de nombreux paramètres de mise en œuvre de la matière influençant plus ou moins la qualité des pièces obtenues. L'interaction de plusieurs paramètres peut amplifier les variations de propriétés ou, au contraire, si elle est intelligemment conduite, peut minimiser ces variations et conduire à une plus grande régularité de la qualité : programme d'optimisation PVT, par exemple.

Chaque constructeur s'attache donc à présenter des presses permettant de maintenir les divers paramètres dans des limites aussi étroites que possible, pour conserver un niveau de qualité maximal avec une dépense matière minimale et un rendement des presses maximal. Un soin particulier est apporté à la régularité des températures.

L'informatisation des presses fait partie des moyens pour améliorer et généraliser le contrôle, la régulation et le suivi de ces différents paramètres avec, en plus, la possibilité d'élargissement à beaucoup d'autres facteurs concernant la fabrication et la gestion des ateliers.

Chaque constructeur propose des gammes de systèmes d'aide à la conduite de sophistication croissante, allant jusqu'à la gestion complète d'ateliers entièrement automatisés. Outre les divers systèmes de régulation, leur type, les organes de sécurité divers, le cœur du système est constitué d'un micro-ordinateur plus ou moins puissant avec des logiciels plus ou moins évolués. Des sociétés informatiques développent également des logiciels particuliers. Avant d'examiner quelques points généraux, il faut rappeler l'importance des principaux paramètres.

3.5.1 Influence de la température matière

D'une façon générale, l'augmentation de la température matière dans la zone normale de travail du polymère mis en œuvre :

- augmente la fluidité ;
- diminue l'orientation, donc améliore l'isotropie ;
- réduit la tendance au gauchissement ;
- diminue les différences des retraits longitudinaux et transversaux ;
- peut améliorer la résistance au choc dans certains cas, et diminuer la différence entre les résistances au choc dans les sens d'écoulement longitudinal et transversal ;

- agit sur le brillant de surface dans certains cas ;
- joue sur le temps de relaxation des contraintes ;
- diminue le temps total acceptable d'exposition à la température avant dégradation.

Si l'on dépasse la zone normale de travail du polymère mis en œuvre, il y a dégradation d'autant plus rapide que la température est élevée.

■ Influence de la température de la matière sur sa viscosité

Le graphique de la figure 3.9 montre la diversité des évolutions de la viscosité à une vitesse de cisaillement donnée de six thermoplastiques courants en fonction de la température.

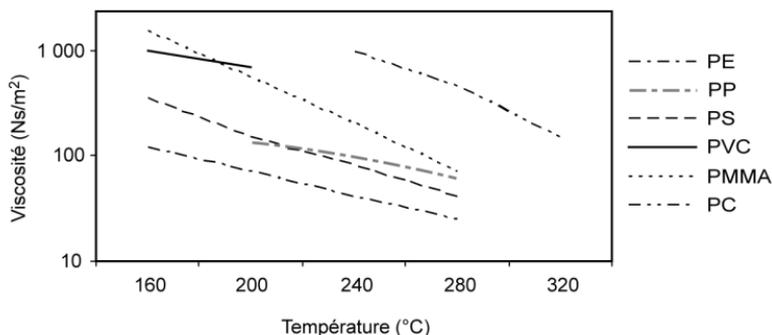


Figure 3.9 – Viscosité en fonction de la température.

Le tableau 3.11 indique le trajet parcouru par injection dans un moule spirale en fonction de la température du polymère. Les neuf spirales utilisées étant de dimensions et formes différentes, les résultats ne sont pas comparables entre eux. À titre d'exemple, pour un même grade, toutes conditions d'injection identiques, la distance parcourue passe de 400 à 1 000 mm lorsque l'épaisseur de la spirale passe de 1 à 2 mm.

Tableau 3.11 – Exemples d'évolutions des trajets d'injection.

Polymère	Référence de spirale	Température (°C)	Trajet (mm)	% d'augmentation du trajet (mm/°C)
PP	A	230	2 000	0,7
		260	2 400	
	B	230	850	0,6
		260	1 000	
	C	230	950	0,8
		260	1 175	
	D	225	650	0,9
		250	790	
PP 40 % talc	E	225	380	1,4
		250	510	
	F	230	240	2,2
		260	400	
POM	G	280	170	1,8
		300	230	
	H	250	175	1
		270	210	
	I	210	205	0,7
		230	235	

■ Influence de la température de la matière sur l'anisotropie des pièces

Le tableau 3.12 indique les rapports d'anisotropie (valeur dans le sens de l'écoulement/valeur dans le sens transversal) pour différentes propriétés en fonction de la température d'injection. L'anisotropie est d'autant plus marquée que ce rapport est élevé. On peut constater des variations très différentes avec des diminutions de plus de 20 % pour le PMMA et une constance des résultats dans les autres cas.

Tableau 3.12 – Exemples d'évolutions des coefficients d'anisotropie.

Polymère	Propriété étudiée	Température d'injection (°C)		
		240	250	260
PMMA	Choc non entaillé	1,8	1,6	1,4
	Choc entaillé	1	1	1
PP	Retrait sur plaque	1,27		1,2
		1,05		1,02

■ Influence de la température de la matière sur la résistance au choc des pièces

Le tableau 3.13 présente des exemples d'évolutions des résistances au choc, qui dépendent à la fois du type d'essai et du polymère.

Tableau 3.13 – Exemples d'évolutions des résistances au choc.

Polymère	Type d'essai au choc	Température d'injection (°C)		Variation de la résistance (%)
		Basse	Haute	
ABS	Poinçon tombant sur une boîte	260	280	6
SB	Poinçon tombant sur une boîte	260	280	58
		260	280	> 1 000
PP	Non précisé	240	260	25
PMMA	Choc non entaillé	240	260	- 13
		240	260	- 6

■ Influence de la température de la matière sur le brillant de surface des pièces

Pour un grade donné d'ABS, le tableau 3.14 indique des exemples d'évolutions des brillants de surface pour différentes valeurs de température du moule, durée d'injection, température matière. Tous essais confondus, les écarts sont importants, pouvant représenter jusqu'à 35 %.

Tableau 3.14 – Exemples d'évolutions des brillants de surface.

Température de moule (°C)	Durée d'injection (s)	Température d'injection (°C)		
		230	255	280
60	0,4	67	67	67
60	2	67	67	62
30	0,4	60	62	60
30	2	55	56	43

■ Influence de la température de la matière sur la dégradation thermique des pièces

Dans cet exemple d'un polyester thermoplastique chargé fibres de verre, un dépassement de 12 °C de la température maximale recommandée pendant un temps total de séjour de 13 min dans la presse entraîne des taux de dégradation qui dépendent de la propriété prise en considération, par exemple :

- la résistance en traction diminue de 16 % ;
- la résistance en flexion diminue de 16 % ;
- le choc Izod reste inchangé ;
- le choc traction diminue de 32 %.

3.5.2 Influence de la pression d'injection

Généralement, l'augmentation de la pression d'injection augmente le cisaillement donc la température matière et la vitesse d'injection. La viscosité diminue et l'injectabilité augmente mais l'orientation également. Le retrait diminue.

■ Influence de la pression d'injection sur le retrait

Le tableau 3.15 indique des exemples de retraits de différents thermoplastiques en fonction de la pression d'injection : ces mesures étant faites suivant des méthodes différentes, elles ne sont pas comparables entre elles pour des produits différents.

Tableau 3.15 – Exemples de retraits (%) en fonction de la pression d'injection.

Polymère	Pression d'injection (bar)		
	400	700	1 100
PP	2	1,8	1,6
PP 10 % de talc	1,5	1,2	1
PP 40 % de talc	1	0,8	0,7
POM		2,1	1,8

■ Influence de la pression d'injection sur l'injectabilité

Le tableau 3.16 indique des exemples de longueurs injectées dans des spirales types. Celles-ci et les conditions d'injection étant différentes pour chaque polymère, les résultats ne sont comparables que pour un même polymère.

Tableau 3.16 – Exemples de longueurs (mm) injectées dans des spirales types en fonction de la pression d'injection.

Polymère	Pression d'injection (bar)				
	400	700	1 000	1 500	2 000
PE-HD 20 % fibres de verre	300	420	550		
ABS		200		450	
PET		350	460	650	800
PET 30 % fibres de verre		300	400	550	700
PC faible viscosité				190	220

Tableau 3.16 – Exemples de longueurs (mm) injectées dans des spirales types en fonction de la pression d'injection. (suite)

Polymère	Pression d'injection (bar)				
	400	700	1 000	1 500	2 000
PC forte viscosité				120	140
PPO		310	400	500	750
PPO ignifugé		270	340	450	550

3.5.3 Influence de la pression de maintien

L'augmentation de la pression de maintien est surtout sensible près du seuil. En général, elle provoque une légère diminution du retrait et des retassures, une augmentation de l'orientation par fluage et une diminution de la relaxation. Dans certaines conditions, elle peut induire des contraintes résiduelles.

À titre d'exemple, le retrait après deux semaines d'un polyacétal moulé sous forme de boîtes d'épaisseur de paroi 1,5 mm est de :

- 2,02 % pour une pression de maintien de 300 bar ;
- 2,05 % pour une pression de maintien de 600 bar.

3.5.4 Influence de la vitesse d'injection

Une vitesse d'injection élevée peut augmenter la température de la masse fondue par cisaillement, diminuer la viscosité, éviter la solidification prématurée de la masse fondue, permet une meilleure transmission de la pression de maintien à l'intérieur de la masse fondue, en début de la phase de maintien. Elle agit favorablement sur les lignes de soudure mais augmente l'anisotropie surtout en surface et peut également influencer sur le brillant dans certaines conditions.

Le tableau 3.17 montre que, généralement, le brillant diminue lorsque la vitesse d'injection diminue mais que le phénomène peut être amplifié ou atténué par des réglages de températures de masse fondue et de moule.

Tableau 3.17 – Exemples de variation du brillant en fonction de la vitesse d'injection.

Température de masse fondue (°C)	Température de moule (°C)	Vitesse d'injection	Variation du brillant (%)
255	30	Élevée	Valeur de base
		Lente	- 10
	60	Élevée	Valeur de base
		Lente	0
280	30	Élevée	Valeur de base
		Lente	- 28
	60	Élevée	Valeur de base
		Lente	- 7

3.5.5 Influence de la température du moule

En général, l'élévation de la température du moule :

- augmente les phénomènes de dilatation thermique donc le retrait ;
- favorise la soudure des fronts des flux de matière et augmente la résistance des lignes de soudure ;
- augmente le brillant ;
- favorise la relaxation et une diminution des tensions internes ;
- augmente la cristallinité pour les matières cristallines ou semi-cristallines ;
- peut faire diminuer la résistance au choc ;
- diminue la tendance au gauchissement ;
- augmente le temps de refroidissement et, par suite, ralentit la production et augmente les coûts de transformation.

Certains producteurs de polymères signalent également que la température peut influencer dans certains cas sur les propriétés électriques.

Pour certains grades, il est parfois recommandé d'utiliser une température de moule au moins égale à la température ultérieure de service.

■ Influence de la température du moule sur le retrait

Le tableau 3.18 confirme, pour un polyamide et un polyacétal, l'augmentation générale du retrait lorsque la température du moule croît mais l'épaisseur de paroi joue un rôle important.

Tableau 3.18 – Exemples de variations du retrait (%)
en fonction de la température du moule.

Polymère	Épaisseur de paroi (mm)	Température de moule (°C)			
		30	60	90	120
PA	1,5		0,7	1	
	3		1,2	1,7	
	12		3	3	
POM	1,5	1,2	1,25	1,45	1,85

■ Influence de la température du moule sur le brillant de surface des pièces

Sur un même grade d'ABS, pour une température matière fixée, le brillant diminue lorsque la température du moule décroît, par exemple de 7 à 10 % suivant la vitesse d'injection.

■ Influence de la température du moule sur la résistance au choc des pièces

Le tableau 3.19 indique quelques exemples de variations de la résistance au choc en fonction de la température du moule. Les variations dépendent du type d'essai au choc comme le montrent les résultats sur un polyamide semi-aromatique.

Tableau 3.19 – Exemples de variations de la résistance au choc en fonction
de la température du moule.

Température du moule (°C)	Choc entaillé		Choc non entaillé	
	Valeur	Variation (%)	Valeur	Variation (%)
60	7,6	-	38,5	-
90	7,5	- 1	32,7	- 15
120	7,2	- 5	23,8	- 38

3.5.6 Exemples de systèmes d'aide proposés par les constructeurs de presses

La puissance des systèmes informatiques donne accès à d'immenses possibilités nécessitant un soin particulier de la sélection des tâches réalisables pour aboutir à un système adapté aux problèmes à résoudre sans alourdir le fonctionnement et sans perturber le personnel utilisateur. De nombreuses sorties et entrées autorisent l'impression, la gestion d'appareils externes, le raccordement à des systèmes centralisés, etc.

La documentation complète de la machine peut être appelée à l'écran sous une forme facilitant et accélérant les recherches de renseignements. Les vitesses de traitement du système de commande ne doivent pas limiter la cadence de la presse.

La présentation symbolisée et organisée doit permettre une interprétation intuitive aisée pour guider efficacement le régleur.

Le rejet expliqué en clair de toute valeur incohérente augmente la fiabilité du système.

Les différentes fonctions telles que fermeture, injection, chauffage, état du moule, refroidissement, etc. sont suivies indépendamment, éventuellement sous forme graphique.

Les fonctions de mise en route et réglage des presses doivent faciliter et accélérer les démarrages de production alors que les fonctions de maîtrise de la qualité doivent conduire aux meilleurs taux de déchets et hors spécifications conduisant aux meilleures performances économiques.

■ Gestion de l'injection

L'architecture modulable autorise des extensions pour le traitement de nombreux équipements périphériques additionnels. Précision et répétitivité sont obtenues grâce à une maîtrise de la phase d'injection dynamique, un passage en maintien précis par traitement spécifique ultra-rapide de l'information, un choix du mode de passage en maintien par la sélection du paramètre de référence, par exemple la pression dans le vérin d'injection, la pression dans le moule.

Les mouvements internes ou externes des outillages sont commandés et contrôlés. L'introduction des séquences préprogrammées dans les mémoires, par simple appel d'un numéro, élimine tout risque d'erreur.

La configuration du système de régulation thermique offre un choix total et direct de chaque zone, des différentes sections de chauffage du fourreau, de la buse, du moule, des extensions.

L'introduction de valeurs de consigne et la surveillance automatique de l'écart maximal avec la valeur réelle du paramètre assurent la régulation du paramètre et peut commander une alarme systématique ou plus sélective, seulement en cas d'échec de la correction automatique. L'adaptation de régulations externes est aussi possible.

La surveillance de certains écarts des paramètres importants permet, automatiquement ou par sélection à l'écran, l'interdiction de toute opération susceptible d'endommager le matériel ou de conduire inévitablement à une production en déchets. Par exemple, pour éviter toute dégradation de la matière, la mise en chauffe est programmée par paliers, avec contrôle, pour que les différences de température entre les zones restent toujours inférieures à une consigne. La mise en veille est aussi programmable par consignes de température affectables à chacune des zones. Les extensions de chauffe sont pratiquement illimitées.

■ Gestion de la fermeture, ouverture, éjection

Les mouvements d'ouverture et de fermeture sont entièrement réglables en course, vitesse et position, incluant les phases d'accélération et de décélération. La course et la pression de sécurité de fermeture protègent les outillages. Tous ces paramètres sont réglables à l'écran.

■ Gestion et analyse de l'information

À chaque mise en route de la machine, un autotest du système s'effectue. L'affichage à l'écran, à chaque cycle, des valeurs significatives du moulage effectué permet la détection immédiate des anomalies.

Des sorties et un signal de synchronisation pour table traçante fournissent, lors de réglages délicats, des relevés d'une très grande précision.

La gestion de fabrication est assurée avec identification de celle-ci, comparaison des temps réels et standards, suivie du nombre d'injections réalisées, acquisition des paramètres importants. Les systèmes individuels de chaque presse peuvent être associés au système de gestion de production de l'ensemble atelier ou usine, permettant une gestion centralisée de la production des ateliers.

■ Aide au diagnostic de panne

Des signaux lumineux et des alarmes sonores permettent de déterminer la plupart des origines d'incidents éventuels. Sur un tableau synoptique de la presse, des témoins reflètent le fonctionnement sur arrêt machine, permettant

de localiser l'étape au cours de laquelle est survenu l'aléa éventuel. La structure du système autorise des investigations localisées.

La fonction de dépannage répond aux besoins du dépanneur en lui apportant des moyens rapides d'investigation à tous les niveaux.

3.5.7 Exemples d'améliorations de la qualité par utilisation des systèmes d'aide

La figure 3.10 illustre le resserrement des poids de pièces produites pendant un test avec réglage manuel de la presse puis en utilisant le système d'aide à la conduite intégré à la même presse. La plage et l'écart-type sont approximativement divisés par deux.

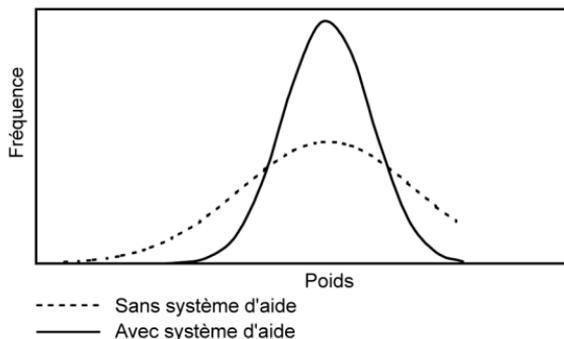


Figure 3.10 – Poids des pièces avec et sans système d'aide.

3.6 Procédés spéciaux d'injection

3.6.1 Production de pièces multi-matières, co-moulage, surmoulage

Plusieurs procédés permettent de réaliser des pièces multi-matières en une seule passe ou en deux passes :

- sans reprise, en une seule passe sur des presses à plusieurs groupes d'injection, on parle alors de co-moulage ou de co-injection ;
- en reprise sur d'autres presses, on parle alors de surmoulage.

Le but de la co-injection ou du surmoulage est d'obtenir des fonctions diversifiées pour une même pièce, par exemple des couleurs différentes pour les cabochons de feux arrière pour l'automobile, un toucher souple pour une pièce structurelle très rigide, une surface extérieure amortissante pour des objets fragiles tels que des télécommandes utilisées dans des conditions difficiles.

■ Injection simultanée directement dans le moule

L'injection simultanée, directement dans le moule, de deux matières différentes à l'aide de deux unités d'injection est représentée schématiquement sur la figure 3.11. Les matériaux noir et gris sont injectés chacun par une unité d'injection (schéma de gauche) jusqu'à remplissage du moule avec les fronts d'injection faisant leur jonction au milieu (schéma du milieu). La plaque bicolore, après décarottage est représentée à droite.

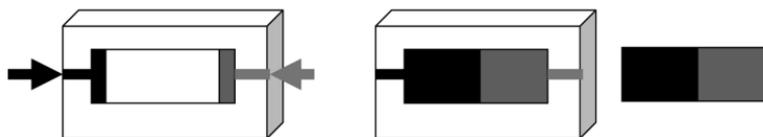


Figure 3.11 – Injection simultanée, directement dans le moule, d'une plaque bicolore.

■ Injections successives de deux matières ou plus, surmoulage

La fabrication en position verticale de la même plaque bicolore présentée précédemment est représentée dans la figure 3.12. Cette fabrication utilise un moule dont la moitié de l'empreinte est réservée par un dispositif mécanique mobile (1^{er} schéma à gauche) qui ne permet d'injecter d'abord que la matière noire. Lorsque l'injection de celle-ci est finie, la partie mobile est dégagée libérant le reste du moule (3^e schéma) pour recevoir le polymère gris injecté à l'aide d'une autre unité d'injection. La pièce terminée (dernier schéma à droite) est la même que dans l'exemple précédent.

Un résultat similaire peut être obtenu en séparant les deux parties du moule par un cache que l'on escamote après la première injection.

Le principe est le même pour les moulages tri-matières : on obture d'abord la partie centrale de l'empreinte, ce qui permet d'injecter les matières des deux parties extrêmes. Ensuite, l'élément mobile libère la partie centrale de l'empreinte pour l'injection de la troisième matière. Les cabochons de feux

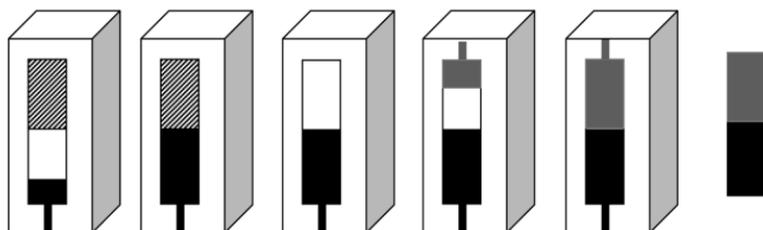


Figure 3.12 – Étapes successives de la bi-injection dans un moule à partie mobile.

arrière automobiles avec stops (rouges), recul (incolors), clignotants (jaunes) sont des exemples bien connus.

Cette technique n'est applicable que lorsque la configuration de la pièce permet l'utilisation d'éléments mobiles.

Une autre application concerne le *surmoulage d'une peau* plus ou moins épaisse comme illustré par la figure 3.13. La peau noire est injectée en premier par une première unité d'injection puis on injecte le noyau gris avec une deuxième unité d'injection.

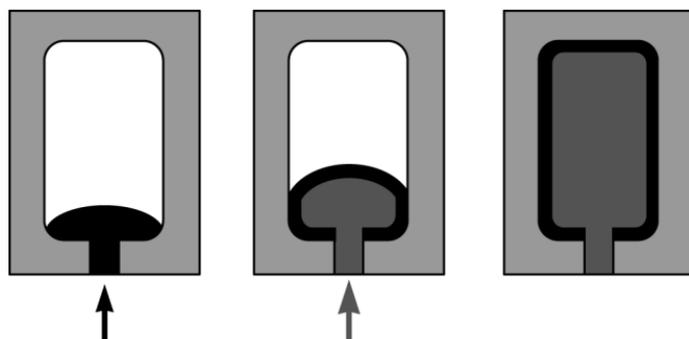


Figure 3.13 – Surmoulage d'une peau sur un noyau dans le même moule.

Le même principe permet la fabrication de *multicouches séquentiels*. La machine d'injection comprend le nombre nécessaire d'unités d'injection (au moins une par matière), une unité de fermeture classique, un moule avec un système de distribution asservi permettant d'alimenter le moule avec chacune des unités d'injection selon une séquence programmée.

■ Injections successives de deux matières ou plus avec transfert de la préforme, surmoulage

Toujours dans l'exemple précédent d'une plaque bicolore, la partie noire est d'abord injectée dans une empreinte à sa mesure. Cette préforme est ensuite démoulée et transférée dans une autre empreinte à la dimension finale de la pièce finie, dans le même moule ou dans un autre, sur la même machine ou sur une autre.

La figure 3.14 schématise le cas du transfert dans une deuxième empreinte du même moule sur la même machine. Dans ce cas, pour gagner de la productivité, les deux injections peuvent être opérées en même temps. Le transfert de la préforme peut être manuel ou robotisé.

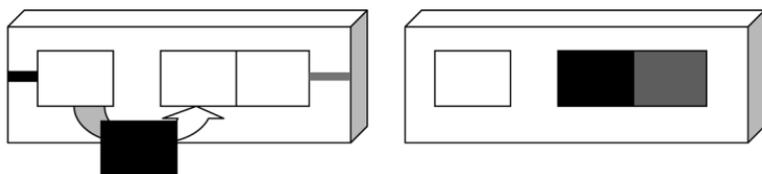


Figure 3.14 – Moulage bi-matière avec transfert de la préforme dans le même moule.

Le surmoulage procède de la même technique, le noyau pouvant être fabriqué bien avant le surmoulage, éventuellement dans un autre atelier ou dans une autre usine.

■ Compatibilité entre les polymères

En général, on recherche une bonne cohésion entre les différents matériaux pour obtenir un assemblage pérenne. En cas d'incompatibilité, l'ajout d'une couche intermédiaire compatible avec chacun des matériaux incompatibles peut résoudre le problème. Des grades compatibilisés de matériaux originellement incompatibles sont également commercialisés, notamment pour les élastomères thermoplastiques utilisés pour le *soft touch*, l'amortissement ou l'étanchéité.

Le tableau 3.20 propose quelques indications générales sur les compatibilités, qui peuvent être contredites par l'utilisation de grades spéciaux et qui doivent être impérativement vérifiées sur les cas concrets réellement posés.

Tableau 3.20 – Exemples de compatibilité entre polymères.

Polymère	PC	PA	CA	PET	TPU	ABS	PSU	PMMA	PVC	PPO	POM	PS	EVA	PBT	PE	PP
PC	S	I		S	S	S	S		S			n		S	n	n
PA	I	S			S							n			I	I
CA			S		S	S			S	n		n	I	S	n	n
PET	S			S		S										
TPU	S	S	S		S	S			S	n		n		S	n	n
ABS	S		S	S	S	S	S		S	n		n		S	n	n
PSU	S						S									
PMMA						S		S	S			n			I	I
U-PVC	S		S		S	S		S	S	n		I	n	S	I	I
PPO		n	n		n	n			n	S		S		n		I
POM											S	n			I	I
PS	n	n	n	n	n	n	n	n	I	S	n	S	S	n	n	n
EVA			I						n			S	S		S	S
PBT	S		S		S	S			S			n		S	n	n
PE	n	I	n		n	n	I	I	I		I	n	S	n	S	I
PP	n	I	n		n	n	I	I	I	I	I	n	S	n	I	S

S : satisfaisant ; I : limité ; n : non satisfaisant

3.6.2 Injection des thermoplastiques renforcés fibres longues (LFRT)

Les LFRT – thermoplastiques renforcés fibres longues (longueur d'ordre centimétrique) – apportent, à taux d'incorporation identique, un renforcement plus élevé que les fibres courtes d'un ordre de longueur millimétrique couramment employées dans les thermoplastiques. Le tableau 3.21 montre les progrès accomplis pour les performances mécaniques. Ceci n'est bien sûr vrai que si les longueurs des fibres centimétriques restent bien dans cet ordre de grandeur dans les pièces finies. Sinon, les performances retombent à des niveaux voisins du renforcement obtenu avec les fibres courtes.

La fibre de verre étant fragile et les fibres de grande longueur ayant tendance à s'orienter et à stagner dans les endroits où le flux change de direction ou est ralenti, il est nécessaire de prendre des mesures de conception spécifiques des machines de transformation et des moules et d'adopter des réglages particuliers des paramètres d'injection.

Tableau 3.21 – Exemples de renforcements par 30% de fibres millimétriques et centimétriques.

Caractéristique	Longueur des fibres		Variation (%)
	Millimétrique	Centimétrique	
Polypropylène renforcé 30 % fibres de verre			
Résistance traction (MPa)	42	80	+ 90
Résistance flexion (MPa)	65	120	+ 85
Module traction (GPa)	4	5	+ 25
Module flexion (GPa)	4	5	+ 25
Allongement (%)	2	3	-
Choc Izod entaillé (J/m)	45	213	+ 370
Polyamide 66 renforcé 30 % fibres de verre			
Résistance traction (MPa)	135	197	+ 46
Résistance flexion (MPa)	175	295	+ 69

Tableau 3.21 – Exemples de renforcements par 30% de fibres millimétriques et centimétriques. (suite)

Caractéristique	Longueur des fibres		Variation (%)
	Millimétrique	Centimétrique	
Polyamide 66 renforcé 30% fibres de verre			
Module traction (GPa)	7,5	10,4	+ 39
Module flexion (GPa)	5,9	9,2	+ 56
Allongement (%)	4	2,4	-
Choc Izod entaillé (J/m)	135	270	+ 100

Les grades renforcés de fibres de longueur de l'ordre de 10 mm peuvent être transformés sur du matériel conventionnel en adaptant simplement les procédés pour ne pas casser les fibres.

Les grades renforcés de fibres de 20 mm et plus ne peuvent plus être transformés sur du matériel conventionnel. Il faut utiliser, par exemple, des vis ou des techniques particulières d'injection.

Certains constructeurs ont résolu le problème en incorporant l'étape de mélangeage de la fibre longue et le moulage sur la même machine ou tout au moins sur la même ligne, évitant ainsi une étape de production et minimisant les problèmes de dégradation dus aux reprises entraînant un supplément de contraintes mécaniques et thermiques. Comme toujours lorsqu'on supprime une étape supplémentaire effectuée en reprise, le coût final s'en trouve amélioré.

Ainsi, KraussMaffei, par exemple, propose sa technologie IMC (Injection Moulding Compounder) combinant une unité de mélangeage et d'injection spécifique avec un système de fermeture standard comme schématisé sur la figure 3.15. Le problème du mélangeage par un procédé continu – l'extrusion – et de l'injection par un procédé discontinu – piston doseur – a été résolu en intercalant un réservoir tampon en sortie d'extrudeuse :

- la bive corotative assure la plastification et le mélangeage, remplit le dispositif d'injection puis le réservoir tampon pendant la phase d'injection ;
- le piston doseur alimente le moule ;

- le réservoir tampon permet le stockage du polymère fondu pendant la phase d'injection de façon à laisser travailler la bécane en continu ;
- un système de vannes commande la circulation du polymère et empêche les reflux de matière.

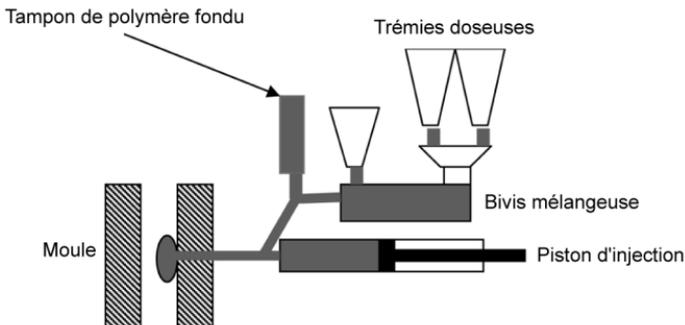


Figure 3.15 – Schéma de principe du procédé IMC.

Cette technologie, d'après le constructeur, apporte un avantage économique de presque 1 € sur le coût matière et peut s'adapter à d'autres types de charges y compris non fibreuses.

3.6.3 Moulage à pression réduite sur supports fragile : back moulding

Pour des applications comme les pièces d'intérieur pour l'automobile, il est intéressant de mouler des thermoplastiques sur des tissus ou autres supports fragiles. Le procédé par injection sous pression réduite permet l'obtention de pièces d'aspect en une seule étape, ce qui conduit à des gains de temps et de coût, notamment en cas d'automatisation, facilement réalisable. D'après Engel, les réductions de coût seraient de l'ordre de 15 à 30 % par rapport aux techniques classiques de laminage.

Le procédé Tecomelt (Engel) d'injection à pression réduite utilise des presses d'injection horizontales conventionnelles légèrement modifiées pour adapter la pression. Pour fixer les idées, celle-ci peut être de l'ordre de 50 bar contre plusieurs centaines pour l'injection conventionnelle.

Signalons qu'une autre variante du procédé utilise une presse verticale à compression.

3.6.4 Injection compression

Les éléments sont identiques à ceux de l'injection mais le procédé est différent en ce qui concerne la mise en pression de la matière dans le moule.

L'unité d'injection plastifie la matière et remplit le moule froid légèrement ouvert, contrairement à l'injection conventionnelle qui se fait dans le moule fermé. La mise en pression est obtenue par fermeture du moule dans une phase finale de compression.

L'orientation du polymère moulé est plus faible qu'en injection, les tolérances dimensionnelles et les poids sont bien respectés mais les moules sont plus onéreux et les machines doivent être adaptées.

À titre d'exemple, le procédé est optimisé par Engel sous le nom d'Optimelt pour la production d'éléments optiques pour l'automobile.

3.6.5 Moulage par Exjection®

IB Steiner et Hybrid Composite Products GmbH ont développé le procédé d'Exjection® combinant l'extrusion et l'injection pour la fabrication de pièces de grande longueur, à parois de faible épaisseur, avec des machines conçues pour des masses injectées et des forces de fermeture plus faibles. Plusieurs constructeurs de presses se sont associés à ce programme, par exemple Arburg et Engel.

Le principe consiste à utiliser l'extrusion pour remplir le moule qui défile perpendiculairement à l'axe de la machine. L'empreinte se remplit du thermoplastique et une pression s'établit assurant le compactage et la reproduction fidèle de la cavité du moule. La longueur de moule réellement en cours de remplissage à un instant donné étant limitée, la pression d'injection peut être réduite ainsi que la force de fermeture, qui peut ne représenter dans les meilleurs des cas que 10 % de celle utilisée pour l'injection conventionnelle.

Le procédé continu d'extrusion ne provoque pas de lignes de soudure et l'orientation moléculaire ainsi que les contraintes internes sont limitées.

IB Steiner et Hybrid Composite Products GmbH estiment que les investissements sont réduits de 30 à 50 % par rapport aux presses d'injection de capacité adaptée aux grandes pièces et que la réduction des coûts de fabrication est de l'ordre de 10 à 70 %.

Les pièces ciblées sont par exemple les chemins de câbles, les réflecteurs d'éclairage longs, les canaux d'écoulement d'eau en polypropylène jusqu'à 3 m de longueur, etc. Pratiquement tous les thermoplastiques, y compris les élastomères thermoplastiques et les grades à hautes performances tels que ABS, SAN, PP renforcés fibres, POM, TPU, TPO, PBT, PC, PMMA, PA6,

PEI, PPSU, PEEK, sont utilisables. Le procédé est également applicable aux moulages sur envers fragiles tels que les tissus et s'adapte aux procédés de décoration dans le moule.

3.6.6 Moulage par intrusion

Le système de plastification extrude la matière dans le moule fermé et le remplit sans mise en pression dans un premier temps. La mise en pression finale de la matière se fait par la pression d'injection de la presse en terminant le cycle de moulage par l'injection d'une petite quantité de matière suffisante pour compléter le remplissage du moule fermé.

L'intrusion permet la fabrication de pièces dont le volume dépasse la capacité de plastification de la presse à injecter.

3.6.7 Injection assistée gaz ou eau pour le moulage de pièces creuses

L'injection assistée gaz ou eau (figure 3.16) est une variante de l'injection de pièces creuses telles que des poignées d'appareils électroménagers et des pièces pour l'automobile.

À part l'injection elle-même, identique à l'injection conventionnelle, trois étapes spécifiques concernent le remplissage du moule et l'introduction de gaz :

- le moule n'est que partiellement rempli de polymère fondu ;
- le gaz est injecté dans le matériau par une filière spécifique aboutissant à l'intérieur de l'empreinte du moule. Le thermoplastique en contact avec les parois du moule étant plus froid et mieux solidifié, le gaz reste au cœur du plastique et le presse contre les parois de la cavité. La pression est maintenue jusqu'à ce que la pièce soit froide et complètement solidifiée ;
- à la fin du cycle, le gaz ou l'eau est évacué avant l'ouverture de moule. Les avantages particuliers dus à l'injection assistée gaz sont les gains de poids et de matière, la réduction des marques d'injection et des contraintes résiduelles. En revanche, la technique est moins répandue et nécessite du matériel spécifique.

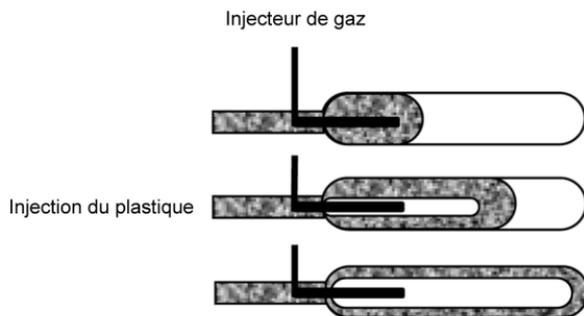


Figure 3.16 – Principe de l'injection assistée gaz.

3.7 Presses hydrauliques, électriques ou hybrides ?

Les presses à injecter « tout électrique », sans circuits hydrauliques, datent du début des années 1980. Le développement de composants électroniques de puissance pour les machines d'usinage à commande numérique a permis leur réel développement depuis le début des années 2000. Le système hydraulique est remplacé par des moteurs électriques et des vis à billes. Longtemps onéreuse, cette technologie semble arriver à maturité, représentant, en 2003, environ 40 % des ventes de presses à injecter au Japon et aux États-Unis. Actuellement, les presses électriques dominent le marché au Japon, en Asie et aux États-Unis et se développent en Europe.

La presse électrique apporte des coûts de production plus faibles, une précision et une reproductibilité intéressantes, des taux de rebuts plus faibles, des temps de cycle optimisés, une consommation énergétique beaucoup plus faible, l'absence de risques de pollution par les fluides hydrauliques et de meilleures conditions de travail.

Les gains en énergie se manifestent à tous les stades du cycle d'injection et peuvent atteindre pour des pièces techniques des niveaux dépassant les 50 %. À titre d'exemples, les gains suivants sont cités :

- 62 % pour une pièce pour l'automobile ;
- 60 % et 58 % pour deux appareils pour le médical en polystyrène ;
- 55 % pour un panneau de douche ;

- 53 % pour un appareil pour le médical en polycarbonate ;
- 40 % pour des pots à fleurs ;
- 33 % pour un connecteur ;
- 28 % pour des appareils divers.

La technologie largement éprouvée de la servocommande électrique conduit à une très bonne fiabilité et une réduction de l'entretien. La précision des mouvements et des volumes injectés serait, approximativement, 10 fois supérieure à celle des presses hydrauliques.

La conception entièrement électrique sans circuit hydraulique réduit considérablement la consommation d'eau de refroidissement, accélère le passage en régime de production stabilisé sans attendre la mise en équilibre de la température du liquide hydraulique, supprime les risques de fuite d'huile et est particulièrement adaptée aux productions en salle blanche ou sous atmosphère contrôlée.

Dans certains cas, les cycles d'injection peuvent être accélérés.

Les presses électriques sont beaucoup plus silencieuses que les presses hydrauliques.

La consommation électrique (de 30 à 60 % plus faible), la réduction de la consommation d'eau de refroidissement, la suppression des traitements d'huiles usagées, l'augmentation de la productivité grâce aux temps de cycle plus courts, l'amélioration de la qualité de production, la diminution des taux de rebuts contribuent également à une amélioration très sensible de la rentabilité.

Le renchérissement des coûts de l'énergie, la diminution du prix d'achat des presses « tout électrique » qui se rapproche de celui des presses hydrauliques renforcent l'intérêt pour les presses électriques, qui entraînent des temps de retour sur investissement de plus en plus courts.

Les avantages des presses électriques souffrent quand même quelques exceptions qui ont donné naissance à une technologie hybride conciliant les avantages des presses hydrauliques et électriques. Ce type de machine garantit à la fois une réponse élevée, les performances d'injection puissantes des machines hydrauliques et la grande précision et répétabilité des machines électriques.

4 • EXTRUSION DES THERMOPLASTIQUES

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

4.1 Principe

Les thermoplastiques peuvent être mis en forme par plastification ou fusion puis par forçage à travers une filière et éventuellement un poinçon formant un entrefer ayant approximativement la forme de la section définitive du profilé. L'extrudeuse (figures 4.1 et 4.2) est l'élément principal de l'ensemble du matériel nécessaire à l'extrusion d'un produit. Cet ensemble constitue une ligne d'extrusion comprenant principalement :

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

- le dispositif de tirage, qui assure l'entraînement du profilé à vitesse constante ;
- les dispositifs annexes : coupe à longueur, marquage.



Figure 4.1 – Extrudeuse Reifenhäuser (avec l'aimable autorisation de Reifenhäuser).

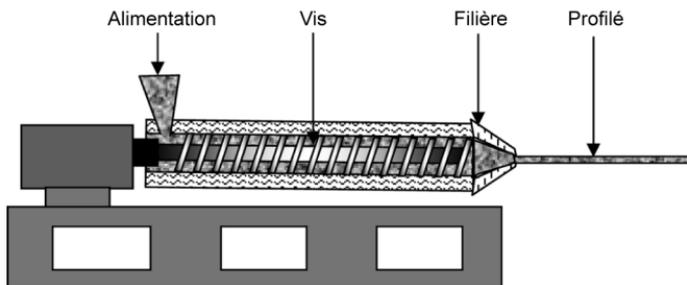


Figure 4.2 – Schéma d'une extrudeuse monovis.

L'extrudeuse monovis courante comprend principalement :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

4.2 Les vis pour extrudeuses monovis

La vis est responsable du transport de la résine jusqu'à la filière, de sa plastification, de la mise en pression de la masse fondue, de la régularité de la température et de la pression qui vont conditionner la régularité des cotes du profilé. Pour assurer correctement son rôle, le profil de vis doit être adapté au thermoplastique à traiter mais il existe des types de vis acceptant plusieurs types de polymères. Le diamètre, le rapport L/D (longueur/diamètre), la vitesse de rotation doivent être adaptés au volume des profilés à extruder. Le matériau de construction et le traitement de surface doivent également s'adapter au thermoplastique à extruder pour présenter à la fois une bonne résistance à la corrosion et à l'usure.

Les vis peuvent être (figure 4.3) :

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

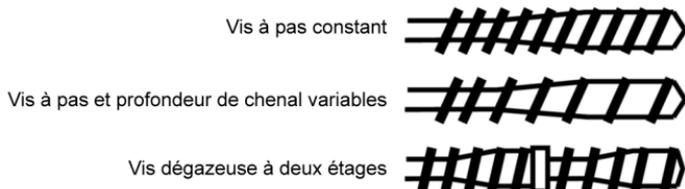


Figure 4.3 – Exemples de profil de vis.

Pour une vis conçue pour du polyéthylène, souvent utilisée comme vis standard pour les polymères de degrés de polymérisation dispersés (polydisperses), fondant à faible température mais dans une plage de température plus ou moins importante (figure 4.4) :

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

Pour une vis pour polyamide, fondant à température plus élevée dans une plage étroite (figure 4.4) :

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

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

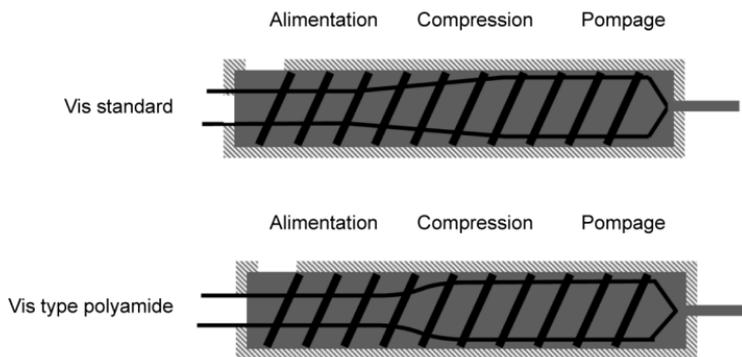


Figure 4.4 – Profils de vis standard et de vis type polyamide.

4.3 Les dispositifs complémentaires des vis

4.3.1 Dispositifs de dégazage

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

4.3.2 Les pompes à engrenage

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

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

4.3.3 Les perturbateurs de flux et amplificateurs de travail mécanique

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

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

4.3.4 Les diviseurs de flux

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

4.4 Têtes, filières et poinçons

La filière a pour mission de donner la forme et les cotes voulues à l'extrudat dans les meilleures conditions de régularité et d'aspect. Si le profilé est creux, il faut utiliser, en plus, un poinçon pour obturer la partie correspondant à la cavité. La figure 4.5 illustre schématiquement le principe de l'extrusion d'un tube. On imagine bien que, si le poinçon est omis, on obtient un jonc de même diamètre extérieur que le tube.

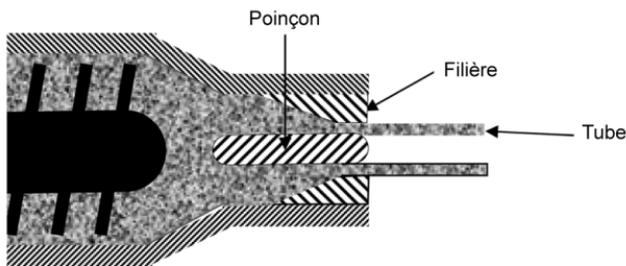


Figure 4.5 – Principe du poinçon et de la filière.

Le diamètre intérieur de la filière et le diamètre extérieur de l'extrudat n'ont pas exactement la même valeur car le polymère, du fait de son retour à la pression atmosphérique dès sa sortie de la filière, se relaxe et donne lieu à une dilatation dite « gonflement à la filière ».

Les filières sont usinées dans des aciers dépendant du type de polymère, des risques de corrosion et d'abrasion ainsi que de la tendance au collage du matériau extrudé.

En admettant que le polymère arrive à la filière dans de bonnes conditions de température, viscosité et pression, il faut encore concevoir la filière et le poinçon pour que la réduction de section entre le fourreau et l'entrefer filière/poinçon soit très progressif et que les écoulements dans la filière ne soient pas turbulents afin que l'extrudat se forme régulièrement en sortie d'extrudeuse. La conception, l'usinage et la mise au point des filières et poinçons sont délicats et onéreux. Étant propres à chaque modèle de profilé, leur coût sera donc à imputer sur chaque fabrication spéciale.

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

La filière est portée par la tête d'extrusion qui solidarise le fourreau et la filière. En général, comme représenté sur la figure 4.5, la filière est montée dans l'axe de l'extrudeuse mais, dans certains cas, ce montage doit être remplacé par un montage en équerre pour libérer la place nécessaire pour monter un outillage encombrant ou le passage pour le fil électrique à gainer comme illustré sur la figure 4.6.

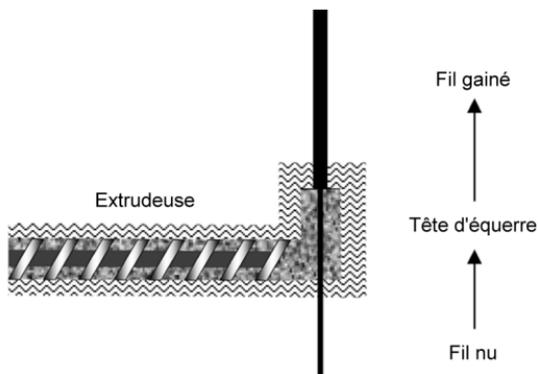


Figure 4.6 – Principe de la tête d'équerre pour gainage de fil.

4.5 Les problèmes thermiques et rhéologiques

L'extrudeuse doit assurer la fusion des polymères par la chaleur générée par le travail mécanique intense dans le système vis-fourreau. L'augmentation de la température au-delà des températures de fusion, fortement différentes suivant les polymères (tableau 4.1), est d'abord bénéfique en diminuant la viscosité des polymères. Cependant, plus ou moins rapidement, il peut y avoir un commencement de dégradation avec perte de performances du polymère, dégagement gazeux, etc. La dégradation peut être favorisée par la présence d'humidité pour les polymères sensibles à l'hydrolyse tels que les polyéthylènes téréphtalates. En général, il est nécessaire d'apporter un complément de chaleur par un système de chauffage du fourreau mais, dans d'autres cas, il peut être nécessaire de refroidir pour limiter ou éviter toute dégradation.

4.5.1 Fenêtres des températures de fusion et d'extrusion de différents polymères

Le tableau 4.1 présente quelques exemples de températures de fusion de diverses matières plastiques. Rappelons que les polymères cristallins tels les polyamides 6 ou 66 ont une fusion franche alors que les polymères amorphes comme le polystyrène passent lentement d'un état solide à un état de fluide visqueux.

Tableau 4.1 – Exemples de températures de fusion des thermoplastiques.

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

Tableau 4.1 – Exemples de températures de fusion des thermoplastiques. (suite)

Polymère	Plage des températures de fusion (°C)	
	Minimum	Maximum
PE-UHMW	120	135
PE-HD	130	130
PVDF copolymère	140	160
PP choc	150	168
CPE	150	170
PP copolymère	155	173
PP homopolymère	160	173
POM choc	164	175
EVOH	140	200
PVDF homopolymère	170	172
PA11 ou 12 plastifié	173	173
POM homopolymère	175	175
PCTFE	200	212
PA6-12	212	212
PA6-10	210	220
PA coulable	215	215
PA6	215	220
PK	220	220
PMP	230	240
PAA	237	237
PET	220	265

Tableau 4.1 – Exemples de températures de fusion des thermoplastiques. (suite)

Polymère	Plage des températures de fusion (°C)	
	Minimum	Maximum
ECTFE	240	245
PBT	220	265
PA transparent	250	250
PA66 Choc	240	265
PA66	250	265
ETFE	270	270
FEP	275	275
LCP	280	280
PPS 40 % FV	275	290
PPS	275	290
PA 4-6	290	295
PCT 30 % FV	295	310
LCP FC	280	330
LCP chargé minéral	280	330
PFA	305	306
PPA 50 % FV longues	310	310
PPA chargé 40 % minéral	310	310
LCP chaleur	325	330
PEEK	334	334
PAEK	320	380
PEEK chaleur	374	374

Le tableau 4.2 présente quelques exemples de températures d'extrusion, qui ne peuvent se substituer à celles données par les producteurs comme bases de départ. Les plages sont parfois très larges en fonction du grade du polymère lui-même, des renforts, de la plastification éventuelle, etc.

Tableau 4.2 – Exemples de températures d'extrusion.

Température (°C)		Abréviation	Polymère
Minimum	Maximum		
150	200	E/VAC ou EVA	Éthylène/acétate de polyvinyle
150	205	CPE	Polyéthylène chloré
150	205	PVDC	Polychlorure de vinylidène
165	205	TPS	Élastomère thermoplastique styrénique
121	260	PE	Polyéthylène
180	215	PVCC	PVC surchloré
200	205	PVC	Polychlorure de vinyle rigide
175	235	ABS	Acrylonitrile butadiène styrène
170	235	TPEE ou COPE	Élastomère polyester thermoplastique
170	235	PEBA	Polyéther bloc amide
175	260	PS	Polystyrène
195	245	TPO	Élastomère thermoplastique oléfinique
180	265	PMMA	Polyméthacrylate de méthyle
180	275	PMMA chaleur	Polyméthacrylate de méthyle
200	260	PA11 ou PA12	Polyamide 11 ou 12
205	275	PVDF	Polyfluorure de vinylidène
220	260	PA69	Polyamide 6-9
210	275	PPE	Polyphénylène éther

Tableau 4.2 – Exemples de températures d'extrusion. (suite)

Température (°C)		Abréviation	Polymère
Minimum	Maximum		
230	260	ABS/PC	Alliage ABS polycarbonate
180	310	PCTFE	Polychlorotrifluoroéthylène
225	275	PA6	Polyamide 6
250	260	PA610	Polyamide 6-10
255	290	PET	Polyéthylène téréphtalate
260	290	E/TFE	Éthylène/tétrafluoroéthylène
315	410	PSU	Polysulfones
350	385	PEEK	Polyéther éther cétone

4.5.2 Influence des variations de température sur le débit d'extrusion

Si l'on admet qu'un thermoplastique extrudé à l'aide d'une filière donnée suit la loi de Poiseuille, alors le débit d'extrusion (Q) est inversement proportionnel à la viscosité (V) et :

$$Q = k/V$$

k est un coefficient propre au matériau, à la filière utilisée dans des conditions données de pression et de taux de cisaillement réel.

La viscosité est elle-même fortement dépendante de la température, toujours pour un polymère donné.

En conséquence, toutes choses égales par ailleurs, une augmentation de la température provoque une diminution de la viscosité et une augmentation du débit comme le montre le tableau 4.3 concernant une augmentation de température de 10 °C à l'intérieur de la fenêtre de transformation de chaque polymère. Il faut noter que les variations de débit ne sont jamais négligeables et peuvent rapidement dépasser les tolérances dimensionnelles exigées pour les extrudats. Les résultats indiqués dans le tableau 4.3 ne sont que des exemples,

en général favorables, et d'autres chiffres nettement plus élevés peuvent être trouvés par ailleurs.

Tableau 4.3 – Estimations des variations de viscosité et de débit pour une augmentation de la température de 10 °C.

Polymère	Variation (%)	
	Viscosité	Débit
PC	- 13	+ 15
PVC	- 9	+ 10
PE	- 12	+ 14
PS	- 16	+ 19
PMMA	- 20	+ 25

4.5.3 Gonflement à la filière et anisotropie

Les macromolécules des polymères thermoplastiques dans un état de repos à température ambiante sont dans une conformation désordonnée. Lorsque la température s'élève, la mobilité des macromolécules augmente et, sous l'action des contraintes d'extrusion, elles tendent à s'orienter et s'étirer dans le sens du flux, d'autant que les passages dans la filière sont étroits. Ces variations d'orientation et d'étirement constituent une des raisons pour lesquelles on recommande de limiter les variations d'épaisseur dans un même profilé. En sortie de filière, la pression chute immédiatement pour revenir à la pression atmosphérique alors que les contraintes dues aux frottements aux parois s'annulent également. En conséquence, les macromolécules se relaxent, tendant à reprendre leur état désordonné initial qui occupe un volume plus important que celui à l'état contraint, d'où le gonflement à la sortie de la filière.

La relaxation n'est pas toujours complète et il peut subsister une anisotropie des propriétés mécaniques. Les coefficients d'anisotropie peuvent être significatifs et ne peuvent pas toujours être négligés dans les évaluations de

propriétés et les calculs de pièce. Dans ce dernier cas, le coefficient de sécurité devra l'inclure en tenant compte de la localisation des points considérés, de la géométrie des profilés et des propriétés fonctionnelles attendues.

À titre d'exemple, un compoundeur donne, pour ses propres produits transformés par ses soins, des résultats de mesures dans les sens parallèle et transverse qui conduisent à des coefficients d'anisotropie évoluant entre 1 (parfaite isotropie) et 2,5 dans des cas extrêmes.

4.5.4 Pressions d'extrusion

Les pressions d'extrusion dépendent de nombreux paramètres liés à la matière thermoplastique utilisée, à l'extrudeuse, à la filière, aux températures en tête et, également, au procédé de fabrication. Si l'on admet qu'un thermoplastique extrudé à l'aide d'une filière donnée suit la loi de Poiseuille, alors le débit d'extrusion est proportionnel à la différence de pression entre l'entrée et la sortie de la filière. Cependant, la pression doit être limitée afin d'éviter les écoulements turbulents. Les plages usuelles de pression sont de l'ordre de 2 à 35 MPa.

4.6 Exemples d'extrudeuses monovis

Le tableau 4.4 présente quelques exemples d'extrudeuses montrant les différences importantes de caractéristiques. Ces chiffres sont purement indicatifs et ne peuvent se substituer à ceux des constructeurs. D'une façon générale, pour des capacités théoriques d'extrusion croissantes, les diamètres de vis, les puissances de chauffage et les puissances totales installées croissent. Pour les exemples recensés concernant l'extrusion par elle-même, les vis ont souvent un rapport L/D élevé, de 25 à 37 pour des productions horaires pouvant dépasser les 1 000 kg/h. Les débits horaires sont fonction du polymère, de sa rhéologie, de la vitesse de vis, des températures et pressions en entrée de filière. Pour l'utilisation en tant qu'opérations auxiliaires de la production de polymères (dégazage, pelletisation...), les rapports L/D varient de 12 à 24 pour des productions horaires pouvant dépasser les 70 000 kg/h. Ces exemples sont loin d'être exhaustifs et des caractéristiques très différentes peuvent être rencontrées. Il importe de faire un tour complet du marché avant de choisir la meilleure solution pour satisfaire son cas particulier ou couvrir le maximum de possibilités prévisibles.

Tableau 4.4 – Exemples de caractéristiques d'extrudeuses.

Diamètre vis (mm)	Rapport <i>L/D</i>	Vitesse vis (tr/min)	Puissance moteur (kW)	Production (kg/h)	Observations
15	25		1,5	3	PE rayures tube
20	25		2,2	6	PE rayures tube
25	25		3	10	PE rayures tube
30	25		4	18	Plastifié
45	25		11	50	Plastifié
	25/30/35	50-220	9,2	PVC 60	PVC, PC, PSE, ABS, PET, PP, PE
	36			PE 270-300 PP 180-210	
60	40	120	30	Mousse physique 75	
	25/30/35	40-160	11	PVC 90	PVC, PC, PSE, ABS, PET, PP, PE
	30		30	80	Alimentation forcée
	36			PE 450-500 PP 290-340	
70	25-37	80-200	40-132	PP 100-150	
75	35		55	170	Alimentation forcée
	36			PE 640-700 PP 440-480	
80	25/30/35	40-120	24	PVC 160	PVC, PC, PSE, ABS, PET, PP, PE
90	40	67	50	Mousse physique 120	
	33		80	280	Agglomérateur ou alimentation forcée
	33	155	132	PP 200-350	
	36			PE 850-950 PP 590-660	

Tableau 4.4 – Exemples de caractéristiques d'extrudeuses. (suite)

Diamètre vis (mm)	Rapport L/D	Vitesse vis (tr/min)	Puissance moteur (kW)	Production (kg/h)	Observations
100	25/30/35	30-100	38	PVC 260	PVC, PC, PSE, ABS, PET, PP, PE
105	35		145	420	Agglomérateur ou alimentation forcée
	36			PE 1 000-1 100 PP 690-760	
120	35	100	220	PC-PMMA 250-400	
125	37		197	650	Agglomérateur ou alimentation forcée
	36			PE 1 200-1 350 PP 860-980	
150	40	34	130	Mousse physique 320	
	35	95	320	PC-PMMA 300-500	
	36			PE 1 400-1 700 PP 1 050-1 280	
160	37		330	1 000	Agglomérateur ou alimentation forcée
180	37	90	400	PS-HIPS 700-1 100	
200	37	90	450	PS-HIPS 750-1 200	
250	12-24	217	450	5 000-6 200	Indices de fluidité 0,3-20
300	12-24	155	670	7 400-9 200	Indices de fluidité 0,3-20
400	12-24	149	1 250	13 600-16 800	Indices de fluidité 0,3-20

Tableau 4.4 – Exemples de caractéristiques d'extrudeuses. (suite)

Diamètre vis (mm)	Rapport <i>L/D</i>	Vitesse vis (tr/min)	Puissance moteur (kW)	Production (kg/h)	Observations
500	12-24	121	2 150	23 600-29 000	Indices de fluidité 0,3-20
600	12-24	110	3 100	34 000-41 600	Indices de fluidité 0,3-20
700	12-24	98	4 200	46 600-56 600	Indices de fluidité 0,3-20
800	12-24	90	5 450	60 600-74 000	Indices de fluidité 0,3-20

Les figures 4.7 et 4.8 montrent les progressions des productions horaires et des puissances des moteurs en fonction des diamètres de vis.

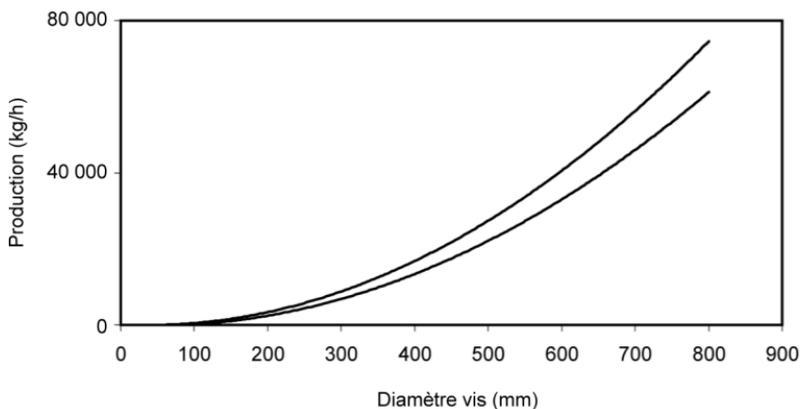


Figure 4.7 – Production (kg/h) en fonction du diamètre de la vis (mm).

Pour une famille de polymères donnée, l'extrusion est très sensible à la rhéologie. À titre d'exemple, la production horaire augmente de 20 à 25 % lorsque l'indice de fusion croît de 0,3 à 20 dans les mêmes conditions d'essai.

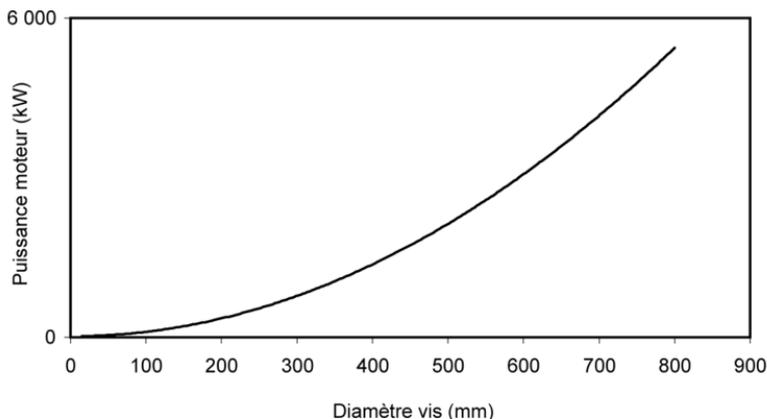


Figure 4.8 – Puissance moteur (kW) en fonction du diamètre de la vis (mm).

4.7 Les extrudeuses bivis

Les extrudeuses bivis, dont le principe rappelle le fonctionnement d'une pompe à vis, jouent un rôle important dans la transformation des matières plastiques pour plusieurs raisons :

- la régularité de l'alimentation, de la fusion et du transport de la matière fondue ;
- la plastification de la matière avec un minimum de contraintes mécaniques ;
- l'efficacité, même pour un fonctionnement avec des vis partiellement remplies ;
- l'excellente homogénéité de l'extrudat ;
- la possibilité d'extruder de larges panels de matières thermoplastiques avec les mêmes vis ;
- les excellentes capacités de mélangeage.

Les extrudeuses bivis présentent des conformations extrêmement diversifiées et peuvent être :

- à vis parallèles ou coniques ;

- corotatives si les deux vis tournent dans le même sens ;
- contrarotatives si les deux vis tournent en sens contraires ;
- à vis engrenantes ou interpénétrées si le filet de l'une pénètre à l'intérieur du chenal de l'autre ;
- à vis tangentes sans interpénétration ;
- à profils conjugués ou autonettoyants si les filets des deux vis sont en contact constant ;
- de construction modulaire, avec montage d'éléments de vis de différentes géométries sur un arbre cannelé, éventuellement associés à des éléments divers.

La combinaison de ces différentes caractéristiques et des géométries de vis très diverses conduisent à une très grande diversité dont les tableaux 4.5 et 4.6 ne donnent que quelques exemples.

Tableau 4.5 – Exemples de bivis corotatives.

Diamètre (mm)	Vitesse (tr/min)	L/D	Puissance (kW)	Débit (kg/h)
22	400	30-60	3	5-15
	600	30-60	4	5-15
	800	30-60	5,5	5-25
30	400	32-64	7,5	10-30
	600		11	10-40
	800	18,5	40-100	
36	400	32-64	15	30-80
	600	32-64	11	30-50
			22	50-140
800	32-64	22	40-100	
41	400	32-64	22	50-100
	600	32-64	30	50-150
			45	130-200
800	32-64	45	90-150	

Tableau 4.5 – Exemples de bivis corotatives. (suite)

Diamètre (mm)	Vitesse (tr/min)	L/D	Puissance (kW)	Débit (kg/h)
51	400	32-64	37	120-230
	600	32-64	55	120-280
			90	320-430
800	32-64	75	200-300	
62	400	32-64	55	180-300
	600	32-64	90	180-400
			160	400-800
800	32-64	110	300-500	
71	400	32-64	90	250-400
	600	32-64	132	250-650
			250	750-1 200
800	32-64	180	500-900	
81	400	32-64	160	450-800
	600	32-64	220	450-1 000
			400	1 000-1 800
800	32-64	315	650-1 100	
93	400	32-64	250	750-1 200
	600	32-64	315	750-1 500
			500	1 500-2 600
800	32-64	400	950-1 600	
116	400	32-64	315	1 000-1 500
	600	32-64	900	2 000-4 500
	800	32-64	600	1 500-2 600
118	600	32-64	500	1 000-2 500
133	400	32-64	550	1 500-3 000
	600	32-64	900	1 500-4 000

Tableau 4.6 – Exemples de bivis contrarotatives.

Diamètre (mm)	Vitesse (tr/min)	L/D	Puissance (kW)	Débit (kg/h)
30	400	32-64	7,5	10-30
	600	32-64	11	10-40
41	400	32-64	22	50-100
	600	32-64	30	50-150
51	600	32-64	55	120-280
62	400	32-64	55	180-300
	600	32-64	90	180-400
71	400	32-64	90	250-400
	600	32-64	132	250-650
75	60	26	45	150-300
90	45	26	55	200-400
93	400	32-64	250	750-1 200
	600	32-64	315	750-1 500
110	45	26	90	300-500
116	400	32-64	315	1 000-1 500
	600	32-64	500	1 000-2 500
120	35	26	110	500-700
133	400	32-64	550	1 500-3 000
	600	32-64	900	1 500-4 000
150	30	26	220	1 000-2 000

Les bivis peuvent être utilisées pour :

- l'extrusion du PVC rigide sous forme de tubes et de profilés par exemple. La fusion et le transport s'effectuent sans auto-échauffement et sans surchauffe ;
- l'extrusion de PVC surchloré (PVCC) ;
- l'extrusion de tubes de grands diamètres ;
- la préparation d'alliages, par exemple polyéthylène et polyamide, polyphénylène oxyde et polystyrène, ABS et caoutchouc, etc. ;
- l'intégration en ligne du compoundage pour aboutir à des lignes intégrées de mélangeage, malaxage, dégazage, incorporation de charges et de renforts, extrusion, granulation, production de plaques par calandrage ;
- la réalisation de réactions chimiques en continu par extrusion réactive ;
- la fabrication des compounds de plastiques techniques incorporant la formulation (stabilisants, colorants, charges, fibres de verre courtes ou longues...), la plastification, le dégazage, la granulation ;
- l'extrusion de fils et câbles électriques ;
- l'extrusion de WPC (Wood Plastic Composites), en fort développement ;
- l'extrusion directe de PET sans préséchage...

4.8 Coextrusion

La coextrusion permet la réalisation de produits longs faits de deux ou plusieurs matières thermoplastiques différant par la couleur, la dureté et autres caractéristiques mécaniques ou physiques ou par les polymères eux-mêmes. Pour une bonne cohésion du produit fini, il faut que les matériaux soient compatibles (voir paragraphe « Compatibilité entre les polymères » du § 3.6.1) ou, dans le cas contraire, extruder une couche d'adhésif intercalée entre les deux polymères. Chaque matériau constitutif est extrudé dans la même filière alimentée par autant d'extrudeuses que nécessaire. La figure 4.9 présente schématiquement le cas de tuyaux tricouches avec une extrudeuse principale fournissant le revêtement interne et deux coextrudeuses alimentant la filière pour les deux mélanges de revêtement intermédiaire et externe. Les rhéologies et conditions d'extrusion ainsi que la compatibilité des mélanges doivent permettre une parfaite soudure des différentes couches pour obtenir un tuyau monolithique.

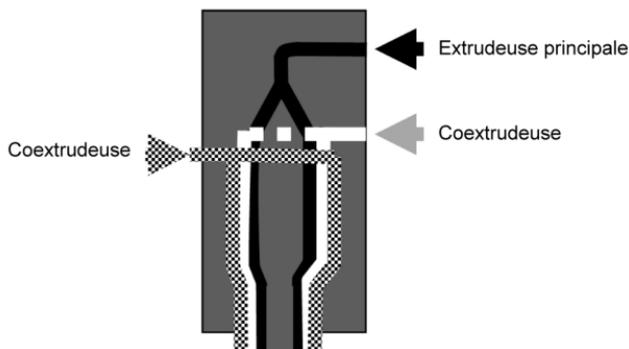


Figure 4.9 – Schéma de principe de la coextrusion de tuyau tricouche.

La coextrusion peut également être utilisée pour réaliser des profilés avec des parties souples et rigides, par exemple un thermoplastique d'ingénierie assurant les fonctions structurelles et un joint souple en TPE ou en PVC plastifié assurant l'étanchéité (figure 4.10), ou encore des profilés bicolores, des tubes avec filets de couleurs différentes, etc.



Figure 4.10 – Principe de profilés à talon rigide et lèvres souples fabriqués par coextrusion.

Les films à plusieurs couches peuvent être utilisés en l'état ou après soufflage pour la production de bouteilles, récipients et réservoirs. Les couches peuvent être du même matériau pour simplement diminuer les risques de bulles, etc., de deux grades différents du même polymère, par exemple un grade vierge et un recyclé, ou de deux polymères complètement différents pour associer leurs propriétés respectives, comme imperméabilité à l'eau d'une part et aux hydrocarbures d'autre part.

4.9 Choix de l'extrudeuse

Le choix principal se fait sur le nombre et le profil de vis. Les indications suivantes sont générales et le choix final doit être fait suivant l'expérience et les indications du fournisseur du grade réellement utilisé. Il faut noter que, pour un même problème, plusieurs solutions peuvent être envisagées et que le contexte économique doit être pris en compte. Par exemple, une extrudeuse pour polyéthylène pourra servir pour l'extrusion occasionnelle de polyamide alors qu'une vis polyamide sera préférée pour l'extrusion régulière du même polyamide.

Pour l'extrusion de tubes de grand diamètre et de profilés de forte section il pourra être nécessaire de passer d'une extrudeuse simple vis à une double vis.

4.9.1 Choix préférentiel d'une monovis

PE-HD – polyéthylène haute densité : généralement, le choix se portera sur une extrudeuse dégazeuse avec une section d'alimentation rainurée, une vis barrière de rapport L/D de l'ordre de 25 à 30 et de taux de compression d'environ 3.

PE-BD – polyéthylène basse densité : généralement, le choix se portera sur une extrudeuse dégazeuse avec une section d'alimentation rainurée, une vis barrière de rapport L/D de l'ordre de 25 à 30 et de taux de compression d'environ 3,5.

PP – polypropylène : généralement, le choix se portera sur une extrudeuse dégazeuse avec une section d'alimentation rainurée, une vis barrière de rapport L/D de l'ordre de 25 à 30 et de taux de compression d'environ 3.

PS – polystyrène : généralement, le choix se portera sur une extrudeuse dégazeuse avec une vis barrière de rapport L/D de l'ordre de 25 à 30 et de taux de compression d'environ 2.

ABS – acrylonitrile butadiène styrène : généralement, le choix se portera sur une extrudeuse avec une vis barrière de rapport L/D de l'ordre de 25 à 30 et de taux de compression d'environ 2,7.

PVC rigide – polychlorure de vinyle : le choix dépend de l'extrudat à réaliser et de la rhéologie du compound. Une biviois peut être nécessaire mais une monovis convient également dans certains cas avec des rapports L/D de 25 à 35. Les matériaux métalliques doivent être résistants à la corrosion.

PVC-P – polychlorure de vinyle plastifié : deux possibilités sont généralement examinées : une extrudeuse dégazeuse avec une section d'alimentation rainurée et une vis barrière ou une extrudeuse à deux étages. Les taux de

compression varient d'environ 2,5 à 3. Les matériaux métalliques doivent être résistants à la corrosion.

PMMA – polyméthacrylate de méthyle : généralement le choix se portera sur une extrudeuse dégazeuse avec une section d'alimentation rainurée, une vis barrière de rapport L/D de l'ordre de 25 à 30 et de taux de compression d'environ 1,8.

PA6 ou 66 – polyamide 6 ou 66 : généralement, le choix se portera sur une extrudeuse avec une vis spéciale pour les polyamides. Toutefois, une vis barrière type polyéthylène de rapport L/D de l'ordre de 25 à 30 et de taux de compression d'environ 3,5 peut convenir.

PC – polycarbonate : généralement, le choix se portera sur une extrudeuse dégazeuse ou non, avec une vis barrière de rapport L/D de l'ordre de 25 à 30 et de taux de compression d'environ 2,3.

Les vis conçues pour du polyéthylène peuvent souvent être utilisées comme vis standards pour les polymères de degrés de polymérisation dispersés.

4.9.2 Choix préférentiel d'une bavis

PVC rigide – polychlorure de vinyle : certaines monovis peuvent convenir mais une bavis peut être nécessaire suivant l'extrudat à produire et la rhéologie. Des bavis dégazeuses avec vis spéciales PVC de rapport L/D de 25 à 30 et de taux de compression 1,7 sont commercialisées. Les matériaux métalliques doivent être résistants à la corrosion.

PVC-C – polychlorure de vinyle surchloré : les bavis dégazeuses avec vis spéciales PVC de rapport L/D de 25 à 30 et de taux de compression 1,7 conviennent. Les matériaux métalliques doivent être résistants à la corrosion.

4.9.3 Extrudeuses spéciales

Certaines extrudeuses, monovis ou bavis, sont constituées, en fait, de deux organes d'extrusion montés en cascade avec éventuellement une chambre de transfert entre les deux parties. Ces dispositions permettent de régler indépendamment les paramètres de fonctionnement des différentes étapes de l'extrusion, depuis l'alimentation jusqu'à la sortie. Cette disposition se rapproche beaucoup du montage en série de deux extrudeuses mais avec l'avantage d'un transfert très direct.

4.10 Les lignes d'extrusion

L'extrudeuse est l'élément principal de l'extrusion mais doit être complétée avec différents périphériques pour constituer la ligne d'extrusion assurant la conservation de la forme obtenue en sortie de filière tout en refroidissant convenablement l'extrudat et en assurant diverses opérations en ligne telles que l'impression des éléments d'identification et de traçabilité, la modification de la forme, la coupe à longueur, la réception et l'emballage des éléments terminés, la réticulation des polyéthylènes s'il y a lieu, etc. Éventuellement, l'extrudeuse principale peut être complétée par une ou plusieurs extrudeuses secondaires ou coextrudeuses traitant chacune un grade différent de la même famille mais dans des couleurs différentes, par exemple, ou traitant des polymères de familles différentes mais compatibles. En cas d'incompatibilité, l'extrusion d'une couche d'adhésif est nécessaire.

L'extrudeuse elle-même doit être choisie en fonction des polymères à traiter. Certaines lignes répondent à des problèmes généraux, d'autres sont hautement spécialisées. Citons simplement à titre d'information :

- tubes et gaines :
 - tubes en PVC rigide diamètre maximal 800 mm,
 - tubes en PE diamètre maximal 800 mm,
 - multicouches,
 - tubes réticulés,
 - tubes pour arrosage goutte à goutte, ronds ou plats,
 - tubes médicaux,
 - tubes alvéolés de diamètre maximal 250 mm,
 - tubes alvéolés double paroi de diamètre maximal 1 200 mm,
 - tubes alvéolés souples pour travaux de jardin,
 - tubes spiralés,
 - tuyaux à couche intermédiaire métallique,
 - ombilicaux,
 - gaines,
 - gaines rétractables ;
- profilés :
 - profilés en PVC rigide et plastifié,
 - profilés pour fenêtres,
 - profilés de portes en PVC expansé,
 - profilés spéciaux,
 - profilés en polypropylène fortement chargé en sciure de bois ;

- produits plats :
 - films coulés,
 - films gonflés,
 - films multicouches,
 - feuilles extrudées calandrées,
 - plaques extrudées calandrées ;
- gainage de fils :
 - fils électriques pour l'automobile,
 - fils électriques pour la basse tension,
 - câbles électriques moyenne tension,
 - câbles électriques haute et très haute tensions,
 - fils, câbles et nappes pour l'électronique et l'informatique,
 - fils téléphoniques,
 - fibres et câbles optiques ;
- filets, grillages et treillis :
 - filets plastiques à maille carrée ou rectangulaire,
 - filets non orientés, mono-orientés, bi-orientés,
 - production en rouleaux de grandes dimensions,
 - grillages à profilés circulaires et rectangulaires ;
- mousses et expansés (voir le chapitre 8 sur les alvéolaires et cellulaires) :
 - expansion de gaz,
 - injection de gaz,
 - décomposition d'agents gonflants ;
- WPC (Wood Plastic Composites) ;
- mélangeage :
 - mélangeage physique,
 - mélangeage réactif ;
- recyclage de déchets plastiques.

4.10.1 Constitution générale d'une ligne d'extrusion de profilés ou de tubes

La ligne d'extrusion comprend typiquement l'extrudeuse, monovis ou biviois, la ou les filières et éventuellement le poinçon ou mandrin pour les profilés creux, les dispositifs de refroidissement et de calibrage, le dispositif de supportage, le système de tirage, les systèmes de finition (coupe à longueur, mise en forme spéciale), le système de récupération de l'extrudat fini.

La ou les filières et éventuellement le poinçon ou le mandrin pour les profilés creux (figure 4.11) sont chargés de mettre l'extrudat à la forme voulue en sortie d'extrudeuse dans des conditions de régularité acceptables. Ces éléments ne peuvent être complètement indépendants des autres systèmes suiveurs, notamment le dispositif de tirage et les différents organes de calibrage qui influent également sur les cotes de l'extrudat. En outre, si l'extrudeuse ne fournit pas un débit suffisamment constant, il peut être nécessaire d'utiliser une pompe à engrenages (voir § 4.3).



Figure 4.11 – Exemple de filière pour tube de grand diamètre (avec l'aimable autorisation de Reifenhauser).

Le système de tirage, par exemple une chenille, est chargé d'entraîner l'extrudat à une vitesse constante adaptée à la rhéologie, avant et pendant le refroidissement. Pour un débit donné en sortie de filière, une augmentation de la vitesse diminue la section de l'extrudat et peut, éventuellement, provoquer des déformations dommageables du profilé. Une vitesse plus lente augmente la section de l'extrudat et peut, éventuellement, provoquer un collage de l'extrudat sur la face externe de la filière.

Les systèmes de refroidissement sont chargés d'amener l'extrudat à une température suffisamment basse pour permettre son passage dans le système de tirage, les conformateurs, le dispositif de récupération du profilé fini, et supporter le stockage. Les plastiques étant, en général, de mauvais conducteurs de la chaleur, les dispositifs de refroidissement seront choisis et dimensionnés en fonction des épaisseurs de paroi. Un simple passage dans l'air ambiant peut suffire pour des films fins alors que des aspersions ou immersions dans l'eau, éventuellement préalablement refroidie, peuvent être nécessaires pour des extrudats à parois épaisses.

Les conformateurs peuvent être indépendants ou combinés avec les systèmes de refroidissement. Le calibrage peut être obtenu par passage à travers des plaques percées ou des anneaux calibrés à la dimension extérieure de l'extrudat. Pour les produits creux, on peut utiliser des conformateurs disposés dans des bacs maintenus sous vide, ce qui a tendance à faire gonfler le tube et à plaquer sa paroi externe sur la paroi interne du conformateur.

Le dispositif de supportage doit être capable de transporter l'extrudat jusqu'au système de tirage sans déformation inacceptable. Dans les cas les plus simples, une courroie transporteuse ou un train de rouleaux conviennent parfaitement.

Les systèmes de finition assurent la coupe à longueur des profilés et éventuellement des opérations de mise en forme spéciale, par exemple la formation des anneaux des tuyaux annelés.

Le système de récupération de l'extrudat fini est chargé de disposer les matériaux finis sous une forme convenant à leur transport et à leur stockage, par exemple des couronnes de tubes ou rouleaux de films.

Parmi les tubes et tuyaux plus particuliers, citons entre autres :

- les tubes de grand diamètre (2 m par exemple), nécessitant des filières et poinçons de grande taille (voir figure 4.11) et des extrudeuses en rapport ;
- les tuyaux multicouches comme ceux destinés au chauffage et à la plomberie, notamment pour l'eau chaude. Des configurations à cinq couches permettent de combiner une couche barrière d'éthylène-alcool vinylique (EVOH), deux couches d'adhésif et deux couches de polyéthylène réticulé (PEX) pour la résistance à la chaleur ;

- les flexibles haute pression (1 000 bar) et haute température (130 °C) avec des diamètres intérieurs importants, par exemple 360 mm ;
- les tubes à parois très fines et satisfaisant à des conditions particulières de fabrication pour le médical en ce qui concerne la propreté, l'innocuité des matériels et des fluides, la précision des produits finis. Les matières plastiques peuvent être aussi diverses que des PVC, des élastomères thermoplastiques ou des fluoroéthylènes propylènes (FEP).

4.10.2 Lignes d'extrusion de films

Deux principes généraux de formation de film coexistent :

- le film coulé, ou film « cast », formé par extrusion directe d'un film déposé sur une bande sans fin ;
- le film gonflé, formé par extrusion d'une gaine gonflée fortement pour obtenir une bulle de grand diamètre et de faible épaisseur.

Le film coulé est extrudé à l'aide d'une filière plate de grande largeur et de faible épaisseur schématisée en vue de dessus sur la figure 4.12. Un dispositif permet de régler précisément la lumière de sortie de la matière plastique pour adapter l'épaisseur du film, qui dépend également de la vitesse de tirage. Évidemment, la principale difficulté est d'obtenir sur toute la largeur de la filière un écoulement isobarique de la masse fondue dans un même état thermique et rhéologique.

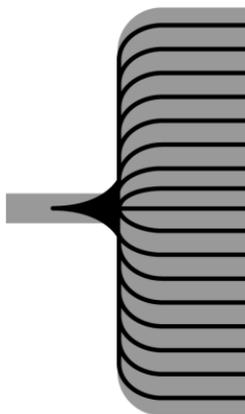


Figure 4.12 – Représentation schématique d'une filière plate.

La figure 4.13 montre l'exemple d'une extrudeuse KraussMaffei équipée de son système d'alimentation et d'une filière plate.



Figure 4.13 – Extrudeuse à filière plate
(avec l'aimable autorisation de KraussMaffei).

La technique du film gonflé, schématisée par la figure 4.14, comprend une extrudeuse, un système de mise en pression de la gaine et un enrouleur de film comme on peut le voir sur la figure 4.15.

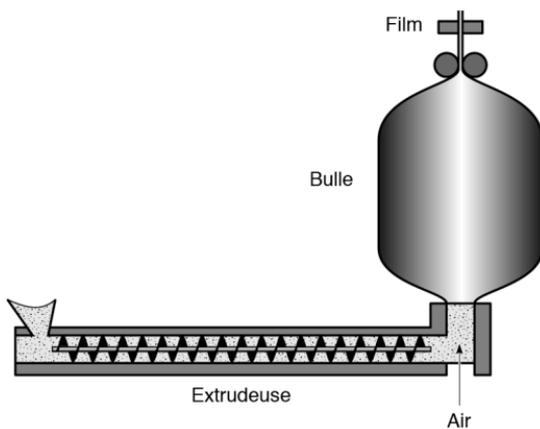


Figure 4.14 – Représentation schématique de l'extrusion gonflage.

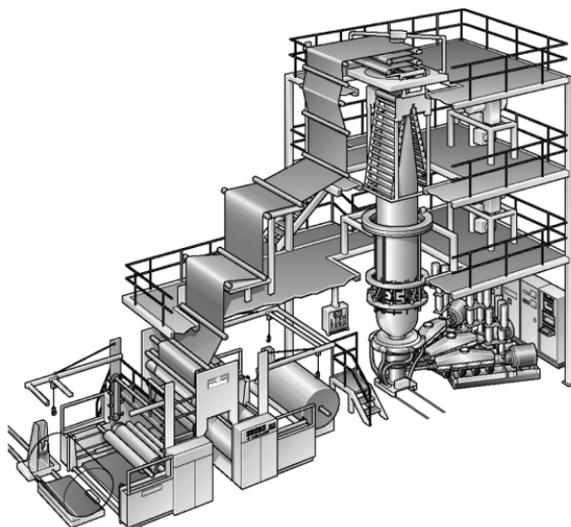


Figure 4.15 – Schéma d'une ligne d'extrusion de film gonflé d'après Reifenhauser.

L'extrudeuse est équipée d'une filière et d'un mandrin ménageant une sortie annulaire pour former la gaine.

Le système d'injection d'air fournit de l'air à pression convenable et régulière pour donner la dimension voulue à la bulle sans la faire éclater.

Le supportage est assuré par des trains de rouleaux.

Un enrouleur (figure 4.16) réceptionne le film terminé sous forme de rouleaux prêts pour le stockage ou l'expédition.



Figure 4.16 – Enrouleur de film Reifenhäuser.

La technique du film gonflé peut également être adaptée aux films multicouches avec des têtes et filières adaptées comme celle représentée sur la figure 4.17.

Les films peuvent également être mono-étirés ou bi-étirés pour modifier leurs propriétés mécaniques et physiques. Les films de polypropylène bi-orienté (BOPP), par exemple, ont des qualités barrières contre les odeurs, l'oxygène et la vapeur d'eau ainsi qu'un aspect brillant qui les font utiliser pour l'emballage de biscuits, chips, friandises, produits de nettoyage, savons, papier, étiquettes... L'orientation par étirage mono-axial ou bi-axial s'applique également aux polyéthylènes, polystyrène (BOPS), polyéthylène téréphtalates (BOPET), polyamides (BOPA).

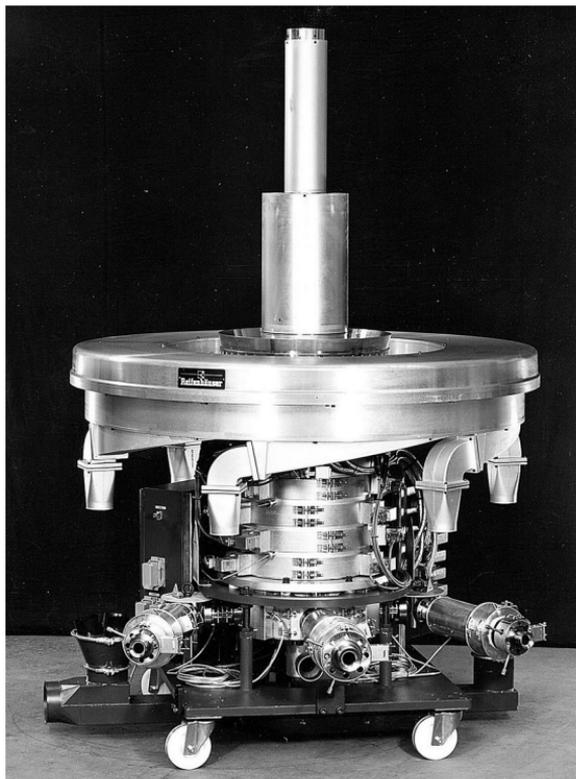


Figure 4.17 – Exemple de filière pour l'extrusion gonflage de film tricouche de Reifenhauser.

4.10.3 Le gainage de fils et câbles

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

Cependant, il existe des caractéristiques communes :

- insertion en continu d'éléments étrangers (fils métalliques le plus souvent) au cœur de l'extrudat principal (gaine plastique) ;
- homogénéité et propreté des extrudats sous peine de générer des défauts électriques dès l'origine ou en cours d'utilisation (décharges arborescentes) ;
- respect des géométries, concentricité, centrage, planéité pour les nappes. Des méthodes de contrôle continu particulières sont utilisées, par exemple les mesures de diamètre et de concentricité par rayons X ;
- productivité et compétitivité économique entraînant des vitesses d'extrusion et de défilement qui dépendent fortement de la nature des fils et câbles, pouvant varier de l'ordre du centimètre par minute pour des câbles haute tension à 1 000 m/min pour des gainages fins de fils téléphoniques. Des tubes de grande longueur permettent le chauffage et/ou le refroidissement à ces très grandes vitesses.

Parmi les caractéristiques spécifiques, citons par exemple :

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

La figure 4.18 schématise un câble avec un conducteur central, deux gaines thermoplastiques (une couche interne et un revêtement externe), un tube d'aluminium et deux couches d'adhésif pour assurer la cohésion entre le tube métallique et les couches de thermoplastique. La ligne d'extrusion comprend trois extrudeuses équipées de deux têtes d'équerre et d'une tête droite.

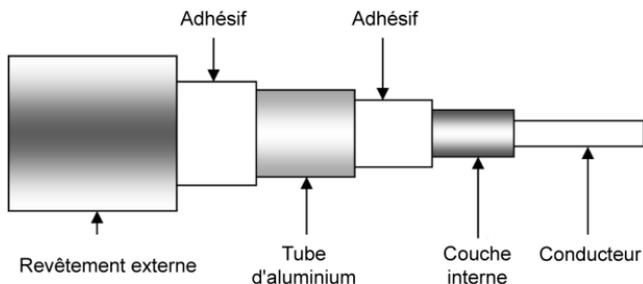


Figure 4.18 – Exemple de construction de câble.

4.10.4 Produits plats épais : feuille et plaques extrudées

Le principe est le même que pour le film coulé : extrusion à l'aide d'une filière plate de grande largeur et d'épaisseur adaptée (voir figures 4.12 et 4.13). Une calandre peut être rajoutée après la sortie de filière pour parfaire la régularité des épaisseurs comme le montre la figure 4.19 avec à gauche la filière plate vue de l'arrière et la calandre suiveuse à trois cylindres.



Figure 4.19 – Exemple d'une ligne de fabrication de feuilles de Reifenhäuser.

4.10.5 Fils, filaments

L'extrusion des fils et filaments utilise une tête plate à filières multiples telle que schématisée sur la figure 4.20. Les problèmes sont ceux des têtes plates avec pour principale difficulté l'obtention sur toutes les filières d'un écoulement isobarique de la masse fondue dans un même état thermique et rhéologique.

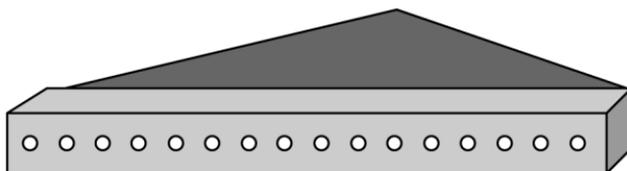


Figure 4.20 – Schéma de principe d'une tête plate à filières multiples pour extrusion de fils.

4.10.6 WPC (Wood Plastic Composites)

Les WPC (Wood Plastic Composites, ou Wood Plastic Compounds) sont composés d'une matrice thermoplastique fortement chargée de fibres de bois. La faible compatibilité entre les deux matériaux nécessite des lignes d'extrusion spécialement conçues avec, par exemple, une extrudeuse baxis contrarotative engrenante à profils de vis adaptés. Un traitement de surface spécial des éléments métalliques de construction doit permettre une bonne résistance à l'usure par ces matériaux fortement abrasifs. La figure 4.21 présente un exemple de ligne avec une tête extrudant deux profilés simultanément.

4.10.7 Filets, grillages et treillis

Filets, grillages et treillis peuvent être fabriqués soit par des déplacements relatifs orthogonaux d'une ou plusieurs têtes d'extrusion par rapport au dispositif de réception, bande transporteuse par exemple, soit par utilisation de têtes spéciales avec filière dynamique. Les procédés sont généralement brevetés.

La première technique ne pose pas de problème d'extrusion particulier, se résumant à une extrusion simultanée de plusieurs filaments.

La deuxième technique requiert des filières et poinçons animés de mouvements obturant et ouvrant plus ou moins progressivement les orifices de sortie pour délivrer les débits et formes correspondant aux différentes parties de la maille du treillis.

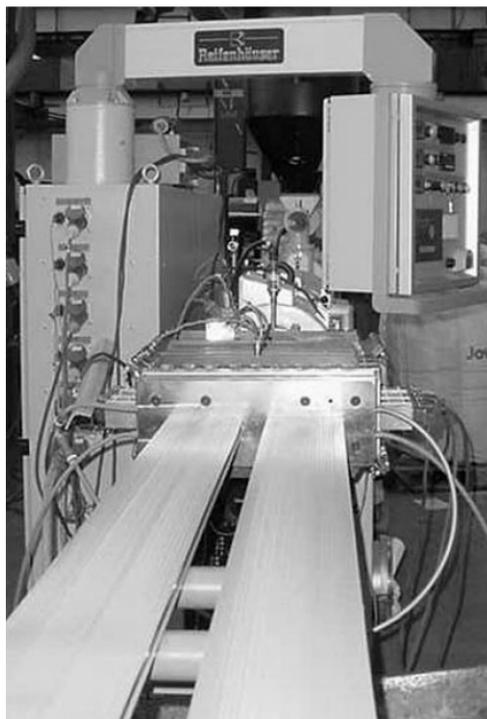


Figure 4.21 – Exemple d'une ligne de fabrication de profilés de WPC de Reifenhäuser.

Les filets et gaines peuvent être à maille carrée, rectangulaire, en losange avec des cordons de formes diverses, cylindriques, carrés, aplatis, etc. Éventuellement, la matière plastique peut être orientée suivant un ou deux axes.

La figure 4.22 montre le principe d'une tête plate dont la lèvres supérieure est animée d'un mouvement alternatif qui met les filières du haut et du bas en coïncidence (vue A de la figure) pour former les nœuds du filet puis en opposition avec les parties planes antagonistes (vue B de la figure) pour extruder les brins de la maille (vue C de la figure). D'autres variantes utilisent des têtes et poinçons animés de mouvements relatifs de rotation ou même plus complexes. Dans tous les cas, les étanchéités sont délicates et les causes de perturbations de l'extrusion sont nombreuses.

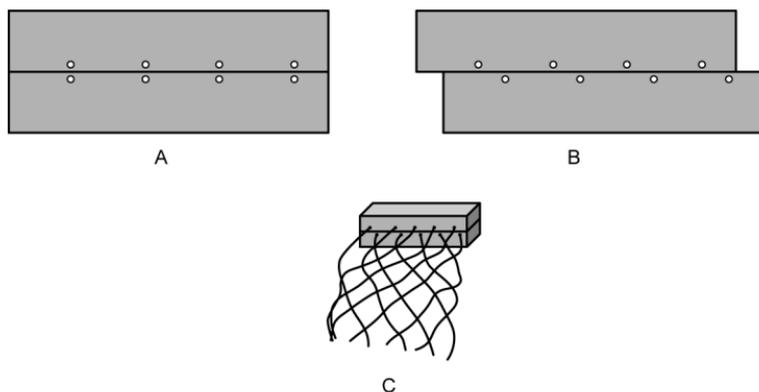


Figure 4.22 – Principe de la fabrication de filets avec une tête plate.

4.10.8 LFRT (Long Fibre Reinforced Thermoplastics)

Les propriétés des LFRT ont déjà été examinées au paragraphe 3.6.2. Certaines lignes de fabrication, par exemple celle de Dieffenbacher construite suivant son nouveau procédé de moulage (LFT-D-ILC) des thermoplastiques renforcés fibres longues, incorporent l'étape de mélangeage de la fibre longue et le moulage sur la même ligne de fabrication. Une étape de production est ainsi évitée, ce qui minimise les problèmes de dégradation dus aux reprises entraînant un supplément de contraintes mécaniques et thermiques. Comme toujours lorsqu'on intègre une étape effectuée primitivement en reprise, le coût final s'en trouve amélioré.

Par exemple, le mélangeage des fibres peut être réalisé dans une extrudeuse en aval d'un premier mélangeur assurant la plastification et la formulation (stabilisants, colorants...) du polypropylène ou du polyéthylène téréphtalate (PET). L'extrudeuse peut être une bivi-vis de 8D (figure 4.23) qui incorpore plusieurs *rovings* préchauffés pour améliorer leur mouillage par la matrice. La longueur moyenne des fibres est de 40 mm et la précision du dosage est de 1 %.

L'intérêt de l'introduction des fibres en milieu de vis est d'en réduire les dégradations, pour deux raisons :

- les fibres ne vont être soumises aux contraintes mécaniques du travail par la vis que pendant un temps plus court et sur une distance réduite de l'extrudeuse ;

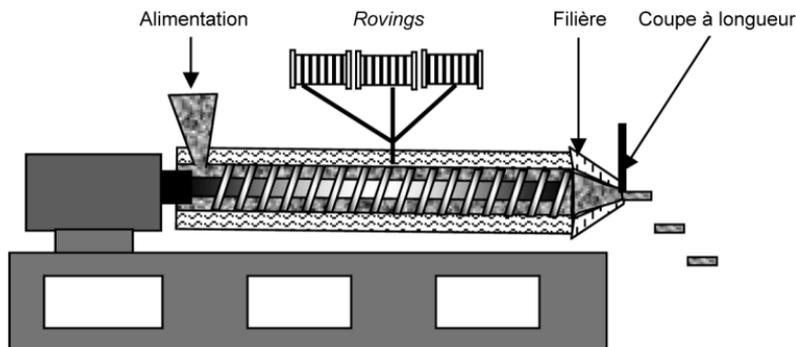


Figure 4.23 – Principe de la fabrication des LFRT par extrusion.

- les fibres sont incorporées dans le polymère déjà fondu, ce qui diminue les contraintes mécaniques par rapport à l'introduction dans le polymère froid et solide au niveau de l'alimentation.

Le facteur de forme est ainsi bien mieux conservé et l'action de renforcement s'en trouve améliorée.

4.10.9 Recyclage de déchets plastiques

L'extrusion est souvent un élément commun à de nombreux procédés de recyclage de déchets triés ou parfois de déchets tout-venant.

Les fonctions demandées à l'extrusion sont de divers ordres :

- compactage : les déchets de feuilles, films, mousses, etc. occupent des volumes importants et contiennent beaucoup d'air, ce qui rend les manipulations difficiles et perturbe l'utilisation des recyclés ;
- filtration : les déchets peuvent contenir des corps étrangers, qu'il faut éliminer pour permettre une réutilisation des plastiques recyclés dans des conditions acceptables ;
- granulation : la présentation usuelle des matières plastiques sous forme de granulés de taille standard facilite l'utilisation des appareils et matériels classiques de l'industrie de transformation des matières plastiques ;
- dégazage : il permet d'éliminer l'air, l'humidité et, plus généralement, les matières volatiles perturbant la mise en œuvre des plastiques recyclés ;
- remise à niveau des propriétés par ajout d'agents de protection, de modifiants de la rhéologie, de charges, de renforts...

Suivant les cas particuliers, sont utilisées des extrudeuses monovis ou bisis et des machines construites spécialement dont une partie est basée sur le principe de l'extrusion. Les systèmes d'alimentation, les capacités horaires de traitement, les étapes initiales diffèrent suivant la nature des déchets à recycler et suivant les buts poursuivis, recyclage interne, multi-clients ou traitement de déchets tout-venant. À titre d'exemple, pour un recyclage en interne, les capacités horaires de traitement de films de polyéthylène peuvent varier de 200 à 2 200 kg pour une gamme complète d'un constructeur.

Pour des déchets tout-venant, un autre constructeur propose des extrudeuses spéciales à alimentation par gravité ou forcée, avec des diamètres de vis de 130 à 180 mm et un dégazage assurant l'homogénéité du granulé. La puissance des machines va de 250 à 400 kW. Le tableau 4.7 indique un exemple de caractéristiques d'une extrudeuse spéciale pour recyclage de plastiques mélangés.

Tableau 4.7 – Exemple d'extrudeuse spéciale pour recyclage de plastiques mélangés.

Diamètre vis (mm)	160
L/D	37
Moteur (kW)	300
Puissance totale de chauffe (kW)	103
Nombre de zones de chauffe	6
Nombre de ventilateurs de refroidissement	6
Puissance par ventilateur (kW)	0,55
Capacité trémie de chargement (l)	840
Type de la pompe de dégazage	Rotative
Puissance de la pompe de dégazage (kW)	5,5
Débit de plastique mélangé lavé (kg/h)	800-1 000

4.10.10 Extrusion-lamination ou couchage ou extrusion « coating »

Cette technique est utilisée aussi bien pour l'emballage que pour des applications industrielles très performantes. Les films multicouches constitués de matériaux hybrides associent un ou plusieurs thermoplastiques avec du papier, du carton, de l'aluminium, etc.

Le principe de base est illustré par la figure 4.24 :

- le substrat (papier, carton, aluminium...) est déroulé en continu pour recevoir un film de thermoplastique extrudé à l'aide d'une tête plate ;
- après refroidissement, le laminé est enroulé pour stockage et utilisation ultérieure.

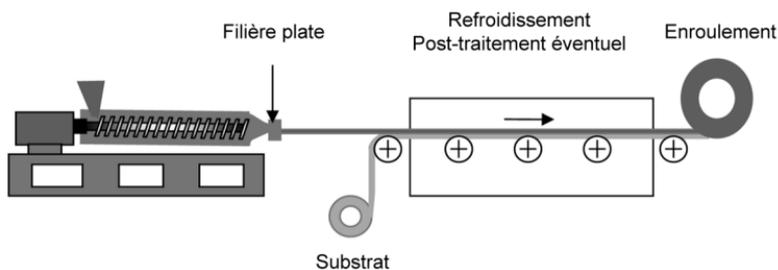


Figure 4.24 – Représentation schématique du principe de l'extrusion-lamination.

Si nécessaire, la ligne de fabrication peut inclure des prétraitements d'adhésion pour assurer l'adhésion du substrat avec le thermoplastique. Plusieurs extrudeuses peuvent être utilisées pour les films multicouches et des traitements de finition peuvent être appliqués après la lamination et avant enroulage.

La structure hybride de ces films permet de concilier les avantages des différents matériaux, les thermoplastiques convenablement choisis apportant leurs propriétés barrières à l'humidité, à l'eau, aux graisses, aux arômes ou certains gaz et l'aptitude à la soudure. Les autres matériaux, suivant leur nature, apportent les performances mécaniques des métaux, l'aptitude à l'impression des papiers et cartons, l'aspect et le toucher particuliers propres à chaque matériau. Les applications sont aussi variées que les films barrières, les cartes de crédit, les papiers peints, les films antiadhérents, les films soudables...

4.11 Exemples de constructeurs et distributeurs de matériel d'extrusion

Le tableau 4.8 indique quelques constructeurs ou distributeurs de matériel.

Tableau 4.8 – Exemples de constructeurs ou distributeurs de matériel.

Société	Site Internet
Amut	www.amut.it
Battenfeld	www.battenfeld.at www.battenfeld-imt.com
Bausano	www.bausano.it
Berstorff	www.berstorff.com
Brueckner	www.brueckner.com
Clextral	www.clextral.fr
Coperion	www.coperion.com
Corelco	www.corelco.com
Davis-Standard	www.davis-standard.com
Dekuma	www.dekuma-weltec.com
Erema	www.erima.com
Farpi-France	www.farpi.fr
Greiner Extrusion	www.greiner-extrusion.at
Imvolca	www.imvolca.com
KraussMaffei Berstorff	www.kraussmaffe.com
Maillefer	www.mailleferextrusion.com
Milacron	www.milacron.com
Navarini	www.navarini.com
Reifenhauser	www.reifenhauser.com
Rosendahl	www.rosendahlustria.com
Starlinger	www.starlinger.com
Tecnova	www.tecnova-srl.it
Useon Extrusion	www.useongroup.com

4.12 Indications sur la conception et le coût des profilés

4.12.1 Indications générales sur la conception des profilés

La conception des produits extrudés doit être faite en étroite collaboration avec l'extrudeur, auquel un cahier des charges sera soumis concernant l'utilisation visée, les sollicitations et propriétés mécaniques immédiates et à terme, les caractéristiques électriques, les contraintes thermiques, chimiques et environnementales, les propriétés sensorielles.

Une fois le matériau choisi, il est alors possible de dessiner un plan précis du profilé permettant de satisfaire les spécifications mécaniques, physiques, électriques et chimiques. L'outillage, le plus simple possible, sera conçu pour permettre une extrusion dans les meilleures conditions de régularité et de débit. La conception du profilé et de l'outillage qui en résulte est une affaire de spécialistes mais quelques règles simples peuvent être énoncées pour éviter quelques erreurs de départ, par exemple :

- les épaisseurs, si rien ne s'y oppose fonctionnellement, seront de l'ordre de 0,8 à 3 mm. Étant donné la faible conductibilité thermique des plastiques, les fortes épaisseurs augmentent les difficultés d'extrusion et ralentissent le refroidissement, ce qui provoque une augmentation notable du prix de revient ;
- les variations d'épaisseur seront limitées, autant que faire se peut, pour réduire les perturbations d'écoulement et les tensions internes. En cas contraire, il faudra concevoir et réaliser des outillages beaucoup plus complexes et adapter la technique d'extrusion, ce qui augmentera substantiellement le prix de revient ;
- les nervures et cloisons utilisées pour augmenter la rigidité ne peuvent être que longitudinales. Leur retrait au refroidissement peut entraîner des stries longitudinales (retassures) en surface. Si cela n'est pas supportable d'un point de vue esthétique, on peut volontairement dessiner une cannelure à cet endroit ou réaliser une filière et un conformateur plus complexes, donc plus chers, pour dissimuler la strie ;
- les tolérances doivent être objectivement déterminées car plus elles sont serrées, plus le prix de revient augmente. Toutes les cotes ne sont pas aussi facilement maîtrisables et on peut schématiquement les répartir en trois classes :
 - classe A : facilement maîtrisables avec, par exemple, des tolérances de 0,3 à 0,8 mm pour un profilé PVC rigide à trois chambres,
 - classe B : difficilement maîtrisables, tolérances 0,45 à 1,2 mm,
 - classe C : très difficilement maîtrisables, tolérances 0,6 à 2 mm.

Le tableau 4.9 indique quelques exemples de tolérances en fonction de la cote considérée (hors épaisseur de paroi).

Tableau 4.9 – Exemples de tolérances hors épaisseur de paroi.

Cote (mm)	Plage de tolérance (mm)		
	Classe A	Classe B	Classe C
< 10	0,3	0,45	0,6
50-80	0,5	0,75	1,2
120-200	0,7	1,05	1,6
> 200	0,8	1,2	2

Toujours sur un même type de profilé, les tolérances sur l'épaisseur de paroi e sont de l'ordre de :

- $\pm 0,1e$ mm jusqu'à $e = 1$ mm ;
- $\pm 0,03e + 0,1$ mm pour $e > 1$ mm.

On peut noter l'amplitude des tolérances aussi bien en valeurs absolues qu'en valeurs relatives, de l'ordre de 0,4 à 3 % pour la classe A.

Pour de plus amples détails, le Syndicat national de l'extrusion plastique (SNEP-www.snep.org) édite un *Guide de l'utilisateur de profilés plastiques*.

4.12.2 Indications générales sur le prix des profilés

Le prix de revient d'un profilé plastique dépend de nombreux éléments.

L'importance du marché détermine la capacité des extrudeuses et outillages à utiliser. Les filières, poinçons, calibreurs ou conformateurs sont propres à chaque modèle de profilé et leur coût sera donc à imputer sur chaque fabrication spéciale. Leur usinage et leur mise au point sont délicats et onéreux.

Chacune des séries de production supporte les frais fixes de mise en route et d'arrêt de la ligne d'extrusion. Il est donc souhaitable que ces séries soient les plus longues possibles.

La nature du grade exact qui sera utilisé conditionne le prix de la matière première mais influe également sur la facilité (ou la difficulté) d'extrusion, les déchets, etc. À titre d'exemple, on trouvera dans le tableau 4.10, pour un

même profilé, les indices de prix à l'unité de volume, basés sur le prix d'un PVC pris comme base 100.

Tableau 4.10 – Exemples d'indices de prix en fonction de la matière.

Indice	Matière
100	PVC, PE-BD, PE-HD, PP, PS
130	ABS
140	PMMA
170-175	CA, CAB
190	PC

Les tolérances interviennent à plusieurs niveaux, par le nombre de cotes tolérancées, la sévérité des tolérances, la complexité des outillages, les conditions d'extrusion, les taux de rebut.

L'aspect du profilé final intervient également par les exigences parfois difficiles à satisfaire concernant la couleur, le brillant, les défauts d'aspect.

4.13 Systèmes d'aide à la conduite des extrudeuses et lignes d'extrusion

La conduite des lignes d'extrusion dépend de nombreux paramètres concernant la ou les extrudeuses elle-mêmes mais également l'alimentation et les périphériques suiveurs, dont le système de tirage, qui joue un rôle particulièrement important sur les cotes finales de l'extrudat.

La puissance des systèmes informatiques donne accès à d'immenses possibilités nécessitant un soin particulier de la sélection des tâches réalisables pour aboutir à un système adapté aux problèmes à résoudre sans alourdir le fonctionnement et sans perturber le personnel utilisateur. De nombreuses sorties et entrées autorisent l'impression, la gestion d'appareils externes, le raccordement à des systèmes centralisés, etc.

La documentation complète de la machine peut être appelée à l'écran sous une forme facilitant et accélérant les recherches de renseignements. Les vitesses de

traitement du système de commande ne doivent pas limiter la vitesse de réaction en cas de variations des paramètres d'extrusion.

La présentation symbolisée et organisée doit permettre une interprétation intuitive aisée pour guider efficacement le régleur.

Le rejet expliqué en clair de toute valeur incohérente augmente la fiabilité du système.

Les différentes fonctions telles que pressions, températures, dégazage, vitesse de tirage, refroidissement, etc. sont suivies indépendamment, éventuellement sous forme graphique. La réticulation éventuelle de l'extrudat peut être prise en compte, contrôlée et maîtrisée au même titre que la conduite de la ou des extrudeuses.

La mise au point et la diffusion de techniques élaborées de contrôle en continu automatique sur la ligne d'extrusion concourent à l'automatisation complète et à l'amélioration de la qualité.

Les fonctions de mise en route et réglage des extrudeuses doivent faciliter et accélérer les démarrages de production alors que les fonctions de maîtrise de la qualité doivent conduire aux meilleurs taux de déchets et hors spécifications conduisant aux meilleures performances économiques.

4.13.1 Gestion de l'extrusion

L'architecture modulable autorise des extensions pour le traitement de nombreux équipements périphériques additionnels.

Les mouvements internes ou externes des outillages sont commandés et contrôlés. L'introduction des séquences préprogrammées dans les mémoires, par simple appel d'un numéro, élimine tout risque d'erreur.

La configuration du système de régulation thermique offre un choix total et direct de chaque zone, des différentes sections de chauffage du fourreau, de la tête, de la filière, des extensions.

L'introduction de valeurs de consigne et la surveillance automatique de l'écart maximal avec la valeur réelle du paramètre assurent la régulation du paramètre et peut commander une alarme systématique ou plus sélective, seulement en cas d'échec de la correction automatique. L'adaptation de régulations externes est aussi possible.

La surveillance de certains écarts des paramètres importants permet, automatiquement ou par sélection à l'écran, l'interdiction de toute opération susceptible d'endommager le matériel ou de conduire inévitablement à une production en déchets. Par exemple, pour éviter toute dégradation de la matière, la mise en chauffe est programmée et contrôlée pour que les différences de température

entre les zones restent toujours inférieures à une consigne. La mise en veille est aussi programmable par consignes de température affectables à chacune des zones. Les extensions de chauffe sont pratiquement illimitées.

4.13.2 Gestion et analyse de l'information

À chaque mise en route de la machine, un autotest du système s'effectue. L'affichage à l'écran, en temps réel, des valeurs significatives permet la détection immédiate des anomalies.

Des sorties et un signal de synchronisation pour table traçante fournissent, lors de réglages délicats, des relevés d'une très grande précision.

La gestion de fabrication est assurée avec identification de celle-ci, comparaison des temps réels et standards, suivi de la production, acquisition des paramètres importants. Les systèmes individuels de chaque extrudeuse peuvent être associés au système de gestion de production de l'ensemble atelier ou usine, permettant une gestion centralisée de la production des ateliers.

4.13.3 Aide au diagnostic de panne

Des signaux lumineux et des alarmes sonores permettent de déterminer la plupart des origines d'incidents éventuels. Sur un tableau synoptique, des témoins reflètent le fonctionnement sur arrêt machine, permettant de localiser l'étape au cours de laquelle est survenu l'aléa éventuel. La structure du système autorise des investigations localisées.

La fonction de dépannage répond aux besoins du dépanneur en lui apportant des moyens rapides d'investigation à tous les niveaux.

5 • INJECTION SOUFFLAGE ET EXTRUSION SOUFFLAGE DES THERMOPLASTIQUES

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

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

L'injection soufflage permet d'obtenir des cols ou bagues parfaitement définis avec des pas de vis précis et est, en général, utilisée jusqu'à des contenances de 30 l. Le choix des matières transformables est très vaste.

L'extrusion soufflage ne permet pas une définition précise des cols ou bagues et est utilisée pour des contenants de quelques centimètres cubes jusqu'à 10 m³ en PVC, polyéthylène (PE), polypropylène (PP) et polyéthylène téréphtalate (PET) le plus couramment.

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

Les techniques de soufflage sont très utilisées pour la fabrication du petit mobilier et des bouteilles, flacons, réservoirs à liquide de frein ou carburant,

soufflets, fosses septiques, luminaires, bornes, balises, jouets, valises, caisses, citernes, réservoirs, arrosoirs, cuves de chauffe-eau, socles de parasol.

5.1 Principe du soufflage

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

5.1.1 Soufflage conventionnel

Le soufflage combine la plastification ou fusion des thermoplastiques par extrusion ou injection et le moulage par injection d'air comprimé. La figure 5.1 schématise le principe du soufflage :

- vue A : une paraison réalisée par extrusion est introduite dans le moule ;
- vue B : le moule est fermé ;
- vue C : de l'air comprimé est injecté à l'intérieur de la paraison pour plaquer ses parois sur celles du moule froid et en prendre la forme ;
- vue D : le corps creux suffisamment refroidi pour supporter les manipulations est démoulé ;
- vue A bis : la paraison est injectée au lieu d'être extrudée pour améliorer la qualité des goulots et pas de vis dont la précision est celle des pièces injectées. Les étapes suivantes sont identiques aux précédentes.

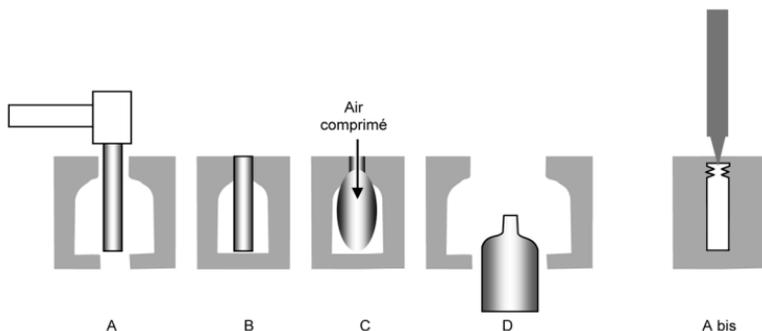


Figure 5.1 – Principe du moulage par soufflage des thermoplastiques.

5.1.2 Soufflage avec étirage axial

Avant le soufflage, les paraisons placées dans le moule peuvent subir un premier étirage mécanique dans l'axe de l'objet à l'aide d'un piston et d'un soufflage suffisamment léger pour ne pas entraîner d'expansion radiale. Cet étirement assure l'amélioration des caractéristiques dans le sens de l'axe, ce qui n'est pas le cas dans le soufflage simple. Après ce premier étirage mécanique, la paraison est soumise au soufflage normal qui provoque l'étirage dans le sens orthogonal à l'axe de la paraison.

5.1.3 Soufflage de multicouches

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

5.2 Les divers types de souffleuses

Sur le principe précédent, les modèles les plus courants se distinguent par :

- le mode de fabrication de la paraison : en ligne ou hors ligne, par extrusion continue ou discontinue ou par injection. En alternative, l'approvisionnement extérieur de paraisons sur catalogue permet de s'affranchir des investissements et de la fabrication des paraisons ;
- le mode de convoyage des paraisons et corps creux en cours d'élaboration : convoyeurs linéaires, plateaux rotatifs. Les premiers sont utilisés pour tous

- les volumes de production alors que les machines rotatives sont surtout utilisées pour les productions de masse ;
- le type de moule, mono-empreinte ou multi-empreintes, en acier ou en alliages légers, permettant la pose d'inserts, pour IML (In Mould Labeling), pour emballages avec anses ou poignées... ;
 - le nombre de stations ;
 - le nombre de modules et de zones de chauffe ;
 - le nombre de préformes et de bouteilles dans la machine ;
 - la puissance électrique installée, d'une vingtaine à près d'un millier de kilowatts ;
 - le degré d'automatisme ;
 - la nature des thermoplastiques utilisables ;
 - le nombre de matériaux : monocouche ou multicouches ;
 - la possibilité de provoquer une orientation par étirement dans le sens axial ;
 - l'aptitude à répondre aux conditions de fabrication aseptiques pour l'emballage de liquides alimentaires, pharmaceutiques ou médicaux ;
 - la pose automatique d'inserts ;
 - le mode d'énergie : hydraulique, tout électrique, hybride ;
 - les productions horaires : jusqu'à plus de 60 000 bouteilles à l'heure ;
 - la géométrie et le volume des corps creux : de quelques centimètres cubes à quelques mètres cubes ;
 - le secteur d'application : emballage, automobile, industrie, etc.

Le tableau 5.1 propose quelques exemples de caractéristiques de souffleuses pour bouteilles, qui sont loin de représenter la totalité des matériels offerts sur le marché.

Le tableau 5.2 propose quelques exemples de caractéristiques de souffleuses pour corps creux industriels, qui sont loin de représenter la totalité des matériels offerts sur le marché

Tableau 5.1 – Exemples de souffleuses pour bouteilles d'eau.

Cadence maximale (bouteilles/h)	6 400	10 800	18 000	28 800	51 000
Caractéristiques machine					
Dimensions (m × m × m)	8,4 × 2,4 × 3,4	8,9 × 9,4 × 4,5	9,2 × 10 × 4,5	14,7 × 8,3 × 4,7	21,5 × 11 × 5,4
Nombre de modules de chauffe	5	8	10-14	16-20	28-36
Nombre de zones de chauffe par module	9	9	9	9	9
Nombre de préformes et bouteilles dans la machine	82	153	215	290	475
Puissance électrique installée (kWh)	125	213	261-355	404-497	700-887
Estimations des consommations horaires pour des bouteilles d'eau de 0,5 et 1,5 l					
Air haute pression (à 35 bar) (Nm ³ /h)	204-437	292-626	448-1 005	717-1 605	1 270-2 848
Air basse pression (à 7 bar) (Nm ³ /h)	58-67				
Électricité (kWh)	24-31	38-51	63-85	100-136	177-238
Eau (m ³ /h)	6	7	10	14	21
Estimations des consommations pour 1 000 bouteilles					
Air haute pression (à 35 bar) (Nm ³ /h)	32-68	27-58	25-56	25-56	25-56
Électricité (kWh)	3,7-4,8	3,5-4,7	3,5	3,5	4,7
Eau (m ³ /h)	0,9	0,6	0,6	0,6	0,4

Tableau 5.2 – Exemples de souffleuses pour corps creux industriels.

Souffleuses mono-station, extrusion continue pour récipients et bouteilles pour produits pharmaceutiques et cosmétiques, peintures, lait, encres, huiles moteur, etc.					
Capacité (cm ³)	200	1 000	3 000	5 000	
Diamètre de vis (mm)	30	45	50	65	
Capacité de plastification (kg/h)	8-10	15-20	25-28	45-50	
Dimensions maximales des moules (L × l) (mm × mm)	125 × 175	220 × 320	300 × 350	350 × 450	
Puissance de chauffe (kW)	4	8	10	20	
Consommation électrique totale (kWh)	7-9	18-24	24-32	37-49	
Souffleuses bi-station, extrusion continue pour récipients et bouteilles pour produits pharmaceutiques et cosmétiques, peintures, lait, encres, huiles moteur, etc.					
Capacité (cm ³)	200	1 000	3 000	5 000	
Diamètre de vis (mm)	40	55	65	90	
Capacité de plastification (kg/h)	12-15	30-35	45-50	90-100	
Dimensions maximales des moules (L × l) (mm × mm)	125 × 175	220 × 320	300 × 350	350 × 450	
Puissance de chauffe (kW)	6	11	18	35	
Consommation électrique totale (kWh)	10-13	25-33	35-46	69-92	

Tableau 5.2 – Exemples de souffleuses pour corps creux industriels. (suite)

Souffleuses de capacité moyenne à accumulateur pour fûts, tonnelets, seaux pour emballage industriel, emballages cylindriques ou cubiques pour huiles alimentaires ou industrielles, etc.						
Capacité (l)	20	20	30	60		
Diamètre de vis (mm)	70	80	80	90		
Capacité de plastification (kg/h)	60-65	80-90	80-90	90-100		
Capacité de l'accumulateur (kg)	3	3	5	5		
Dimensions maximales des moules ($L \times H$) (mm \times mm)	610 \times 555	610 \times 560	660 \times 660	760 \times 760		
Puissance de chauffe (kW)	22	24	27	30		
Consommation électrique totale (kWh)	42-57	52-70	61-81	70-94		
Souffleuses de capacité élevée à accumulateur pour fûts, tonnelets, seaux pour emballage industriel, emballages cylindriques ou cubiques, bonbonnes pour huiles alimentaires ou industrielles, réservoirs à carburant, etc.						
Capacité (l)		100		200		
Diamètre de vis (mm)		100		100		
Capacité de plastification (kg/h)		120-140		250-270		
Capacité de l'accumulateur (kg)		7,5		14		
Dimensions maximales des moules ($L \times H$) (mm \times mm)		810 \times 1115		1 220 \times 1 440		
Puissance de chauffe (kW)		41		58		
Consommation électrique totale (kWh)		100-135		188-250		

Quelques exemples de forces de fermeture figurent dans le tableau 5.3. Elles dépendent évidemment de la taille des moules.

Les temps de cycle réels sont intrinsèquement courts et les temps de cycle apparents le sont encore d'autant plus qu'il y a plus de parois et de corps creux dans la souffreuse. Quelques exemples de temps de cycle réels figurent dans le tableau 5.3.

Tableau 5.3 – Exemples de forces de fermeture et de temps de cycle.

Dimensions maximales des moules (L × l) (mm × mm)	300 × 350	360 × 400	470 × 500	500 × 550	470 × 600
Force de fermeture (t)	3-6	7-8	10-14	17	20
Temps de cycle à vide (s)	1,8	1,7-2,3	2-2,5	3	3,3

5.3 Les thermoplastiques transformables par soufflage

Les thermoplastiques les plus utilisés sont les polyéthylènes, haute et basse densités, les PVC, les polyéthylènes téréphtalates, les polypropylènes (PP) mais les thermoplastiques d'ingénierie se développent en même temps que les applications industrielles : par exemple, polycarbonates (PC), polyphénylène oxydes (PPO), ABS, polyacétals (POM), etc.

Les élastomères thermoplastiques tels que les TPV sont utilisés pour leurs propriétés élastiques alors que, au contraire, des thermoplastiques renforcés fibres de verre courtes sont employés pour leur rigidité. Le soufflage des mousses est également possible en utilisant des grades spéciaux de polyéthylène par exemple.

Enfin, il faut citer les thermoplastiques de spécialité tels que les polyacrylonitriles (PAN) ou les copolymères éthylène-alcool vinylique (EVOH) utilisés en couche interne pour leurs propriétés barrières.

5.4 Les lignes de soufflage

La souffleuse est l'élément principal de la ligne (figure 5.2) mais doit être complétée avec différents périphériques, amont et aval, pour constituer la ligne de soufflage assurant l'alimentation et les diverses opérations en ligne telles que le refroidissement, l'étiquetage dans le moule (IML), l'ébavurage, le broyage et recyclage en ligne des déchets, les tests d'étanchéité, les traitements de finition éventuels, la réception et l'emballage des éléments terminés ou le remplissage en ligne. Le matériel doit être choisi en fonction des polymères à traiter, des pièces à réaliser et des cadences. Certaines lignes répondent à des problèmes généraux, d'autres sont hautement spécialisées.

B

PROCÉDÉS DE TRANSFORMATION

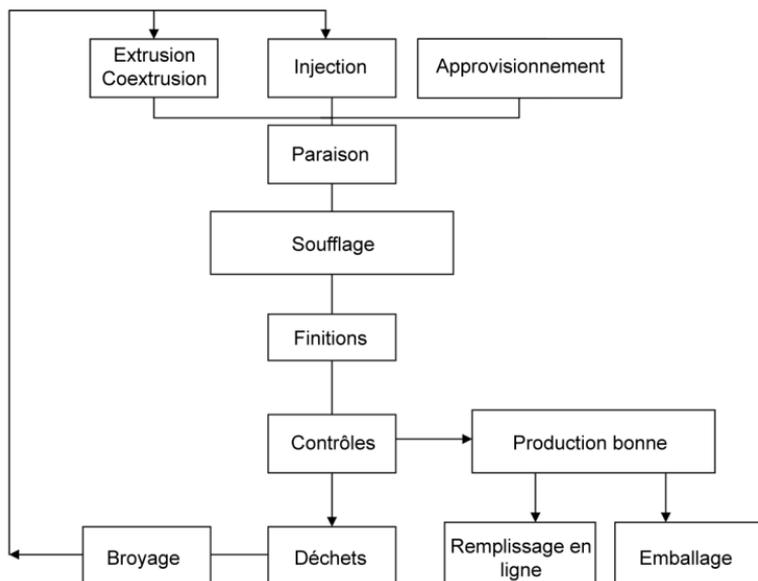


Figure 5.2 – Schéma de principe d'une ligne de soufflage.

L'alimentation peut se faire avec des paraisons :

- fabriquées hors ligne ou hors usine ;
- injectées en ligne ;

- extrudées en ligne. La tête d'extrusion peut comporter un équipement permettant de contrôler en tout point l'épaisseur de la paroi constituant le flacon. Son utilisation entraîne une optimisation du poids des bouteilles et, par suite, une réduction du poids moyen conduisant à une économie de matière. Éventuellement, l'extrudeuse principale peut être complétée par une ou plusieurs extrudeuses secondaires ou coextrudeuses traitant chacune un grade différent de la même famille, grade vierge et grade recyclé par exemple, ou traitant des polymères de familles différentes mais compatibles. En cas d'incompatibilité, l'extrusion d'une couche d'adhésif est nécessaire. Une coextrudeuse peut également être utilisée pour extruder des fenêtres de visibilité permettant de voir facilement le niveau du contenu des bidons et autres récipients au cours de leur utilisation.

La pose des étiquettes peut être réalisée en ligne par des techniques IML (In Mould Labelling).

L'ébavurage, externe et interne, est assuré par des machines spéciales, par exemple des décolleteuses rotatives à disques qui assurent la finition par découpe du déchet du col. Les articles et les déchets de col sont séparés après découpe pour être repris pour la suite du circuit de fabrication ou pour le broyage et le recyclage en ce qui concerne les déchets.

Finition. Parmi les procédés de finition, certains traitements de surface permettent d'améliorer suffisamment les propriétés du thermoplastique utilisé pour prolonger les durées de péremption des matières emballées. Sidel, par exemple, propose son procédé Actis™ qui ralentit les échanges gazeux, réduisant d'une part la reprise d'oxygène et d'autre part les pertes de dioxyde de carbone par perméabilité. Le traitement Actis™ consiste à déposer en 1 à 2 s une fine couche de carbone amorphe hydrogéné sur une des parois ou sur les deux parois de la bouteille en PET afin de faire barrière aux gaz. Ce procédé par plasma d'acétylène comporte cinq étapes :

1. création du vide à l'intérieur et à l'extérieur de la bouteille ;
2. injection d'acétylène dans la bouteille ;
3. transformation de l'acétylène gazeux en plasma sous l'effet d'énergie micro-onde ;
4. dépôt de carbone amorphe sur les parois de la bouteille ;
5. retour à la pression atmosphérique.

Le contrôle peut comprendre, entre autres, des tests d'épaisseur de paroi, de poids et des contrôles d'étanchéité.

Réception ou remplissage. Finalement, les pièces terminées peuvent être réceptionnées, rangées et emballées pour stockage et expédition ou être remplies

directement sur la ligne pour supprimer une opération effectuée en reprise. Techné, par exemple, propose sa machine Unika intégrant l'extrusion soufflage de bouteilles en PE-HD et leur remplissage avec un produit laitier à une cadence de 4 500 pièces/h. Les avantages sont à la fois économiques (réduction de la consommation énergétique de l'ordre de 35 %, économie de main-d'œuvre, gain d'espace au sol et retour sur investissement plus rapide) et techniques (maintenance réduite, rapidité, meilleure hygiène globale).

Broyage et recyclage automatisés des carottes de fond, des déchets de col et des pièces hors spécifications peuvent conduire à des économies substantielles et satisfont aux impératifs environnementaux actuels.

5.5 Le soufflage séquentiel 3D pour tubulures convolutées

Une paraison est réalisée par extrusion séquentielle de deux thermoplastiques dans des proportions relatives permettant d'obtenir l'équilibre voulu de propriétés en chaque point du corps creux à réaliser. Ensuite, la paraison est soufflée de façon conventionnelle.

La technique est appliquée, par exemple, pour produire, à partir de TPV (élastomères thermoplastiques vulcanisés dynamiquement) et de polypropylène (PP), des tubulures 3D à rigidité ajustable par le contrôle des pourcentages de TPV et PP. Les extrémités des tubulures peuvent être souples (fort pourcentage de TPV) alors que la partie centrale peut être rigide (fort pourcentage de PP).

Des souffleuses spécifiques sont proposées par certains constructeurs, Kautex par exemple, pour s'adapter particulièrement au cas des tubulures très complexes, permettant d'améliorer la qualité du moulage et les propriétés finales tout en diminuant les déchets et rebuts, ce qui entraîne des gains substantiels sur les coûts de fabrication.

5.6 Systèmes d'aide à la conduite des lignes de soufflage

La conduite des lignes de soufflage dépend de nombreux paramètres concernant la machine de fabrication des paraisons (presse d'injection, extrudeuse(s))

mais également l'alimentation pour les paraisons fabriquées hors ligne et les périphériques suiveurs, qui peuvent être nombreux.

La puissance des systèmes informatiques donne accès à d'immenses possibilités nécessitant un soin particulier de la sélection des tâches réalisables pour aboutir à un système adapté aux problèmes à résoudre sans alourdir le fonctionnement et sans perturber le personnel utilisateur. De nombreuses sorties et entrées autorisent l'impression, la gestion d'appareils externes, le raccordement à des systèmes centralisés, etc. Les renseignements qui suivent concernent l'ensemble de la fabrication et peuvent être inadaptés pour des schémas de fabrication plus simples.

La documentation complète de la machine peut être appelée à l'écran sous une forme facilitant et accélérant les recherches de renseignements. Les vitesses de traitement du système de commande ne doivent pas limiter la vitesse de réaction en cas de variations des paramètres d'extrusion.

La présentation symbolisée et organisée doit permettre une interprétation intuitive aisée pour guider efficacement le conducteur de la ligne.

Le rejet expliqué en clair de toute valeur incohérente augmente la fiabilité du système.

Les différentes fonctions telles que pressions, températures, dégazage, vitesse de transfert, refroidissement, etc. sont suivies indépendamment, éventuellement sous forme graphique.

La mise au point et la diffusion de techniques élaborées de contrôle en continu automatique sur la ligne de soufflage concourent à l'automatisation complète et à l'amélioration de la qualité.

Les fonctions de mise en route et réglage doivent faciliter et accélérer les démarrages de production alors que les fonctions de maîtrise de la qualité doivent conduire aux plus faibles taux de déchets et hors spécifications entraînant les meilleures performances économiques.

5.6.1 Gestion de la fabrication des paraisons

L'architecture modulable autorise des extensions pour le traitement de nombreux équipements périphériques additionnels.

Les mouvements internes ou externes des outillages sont commandés et contrôlés. L'introduction des séquences préprogrammées dans les mémoires, par simple appel d'un numéro, élimine tout risque d'erreur.

La configuration du système de régulation thermique offre un choix total et direct de chaque zone, des différentes sections de chauffage du fourreau, de la tête, de la filière, des moules, des extensions.

L'introduction de valeurs de consigne et la surveillance automatique de l'écart maximal avec la valeur réelle du paramètre assurent la régulation du paramètre et peuvent commander une alarme systématique ou plus sélective, seulement en cas d'échec de la correction automatique. L'adaptation de régulations externes est aussi possible.

La surveillance de certains écarts des paramètres importants permet, automatiquement ou par sélection à l'écran, l'interdiction de toute opération susceptible d'endommager le matériel ou de conduire inévitablement à une production en déchets. Par exemple, pour éviter toute dégradation de la matière, la mise en chauffe est programmée et contrôlée pour que les différences de température entre les zones restent toujours inférieures à une consigne. La mise en veille est aussi programmable par consignes de température affectables à chacune des zones. Les extensions de chauffe sont pratiquement illimitées.

5.6.2 Gestion et analyse de l'information

À chaque mise en route de la machine, un autotest du système s'effectue. L'affichage à l'écran, en temps réel, des valeurs significatives permet la détection immédiate des anomalies.

Des sorties et un signal de synchronisation pour table traçante fournissent, lors de réglages délicats, des relevés d'une très grande précision.

La gestion de fabrication est assurée avec identification de celle-ci, comparaison des temps réels et standards, suivi de la production, acquisition des paramètres importants. Les systèmes individuels de chaque machine peuvent être associés au système de gestion de production de l'ensemble atelier ou usine, permettant une gestion centralisée de la production des ateliers.

5.6.3 Aide au diagnostic de panne

Des signaux lumineux et des alarmes sonores permettent de déterminer la plupart des origines d'incidents éventuels. Sur un tableau synoptique, des témoins reflètent le fonctionnement sur arrêt machine, permettant de localiser l'étape au cours de laquelle est survenu l'aléa éventuel. La structure du système autorise des investigations localisées.

La fonction de dépannage répond aux besoins du dépanneur en lui apportant des moyens rapides d'investigation à tous les niveaux.

5.7 Les applications du soufflage

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

Citons, sans aucune prétention d'exhaustivité :

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

5.8 Exemples de constructeurs et distributeurs de matériel

Le tableau 5.4 indique quelques constructeurs ou distributeurs de matériel.

Tableau 5.4 – Exemples de constructeurs ou distributeurs de matériel.

Société	Site Internet
AEC Ambition Enterprise Co.	www.plastic-machinery-manufacturer.com
Aoktac	www.aoktac.com
Bekum	www.bekum.de
Chia Ming Machinery	www.cm-pet.com.tw
Davis-Standard	www.davis-standard.com

Tableau 5.4 – Exemples de constructeurs ou distributeurs de matériel. (suite)

Société	Site Internet
Demark	www.demark-pet.com
Graham Engineering Corporation	www.grahamengineering.com
Jomar	www.jomarcorp.com
Kautex Maschinenbau GmbH	www.kautex-group.com
Krones	www.kronesusa.com
Mauser AG	www.mausergroup.com
Milacron	www.milacron.com
Nissei ASB Machine	www.nisseiasb.co.jp
Serta Extrusion	www.serta-extrusion.com
Sidel	www.sidel.fr
Techne	www.technespa.com
Tincoo	www.tincoo.com
Uniloy Milacron	www.milacron.com
Vina International	www.blowmachines.com
Wilmington Machinery	www.wilmingtonmachinery.com

6 • AUTRES PROCÉDÉS DE PREMIÈRE TRANSFORMATION DES POLYMÈRES SOLIDES

6.1 Moulage par compression

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

6.1.1 Principe

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

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

- s'il s'agit d'un thermoplastique, il faut d'abord le chauffer pour l'amener à un état rhéologique permettant sa mise en forme, l'élimination de l'air occlus, la cohésion des différents flux et/ou des particules de matière. Lorsque la pièce est assez fluide et homogène, il faut la refroidir suffisamment pour permettre le démoulage sans l'altérer. Ce processus uniquement physique, assuré par le refroidissement du moule, est d'autant plus long que la pièce est épaisse et que les polymères, sauf exception, sont mauvais conducteurs de la chaleur ;

- s'il s'agit d'un thermodurcissable, silicone par exemple, il faut d'abord le chauffer, comme dans le cas précédent, pour l'amener à un état rhéologique permettant sa mise en forme, l'élimination de l'air occlus, la cohésion des différents flux et/ou de particules de matière. En plus, lorsque la pièce est convenablement fluidifiée et homogène, il faut continuer à la chauffer pour déclencher et assurer la réticulation ou le durcissement ou la vulcanisation jusqu'à un stade suffisant pour obtenir un niveau de propriétés mécaniques permettant le démoulage sans altérer la pièce. Ce processus, uniquement chimique, est assuré par le chauffage du moule et est d'autant plus long que la pièce est épaisse et que les polymères, sauf exception, sont mauvais conducteurs de la chaleur. En plus, la matière en contact avec la surface du moule réticule plus vite et plus intensément que le cœur de la pièce, ce qui pose des problèmes importants d'anisotropie. Si le démoulage est opéré avant la réticulation complète, une post-réticulation, en étuve par exemple, pourra apporter le complément nécessaire de réticulation.

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

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

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

La figure 6.1 schématise le principe du moulage d'un joint annulaire à profil creux (vue de gauche) avec le demi-moule supérieur attaché au plateau supérieur de la presse, le demi-moule inférieur attaché au plateau inférieur de la presse. Ce dernier est actionné par le vérin de la presse pour fermer et ouvrir

le moule. La vue de droite schématise le principe d'un moule piston pour moulage d'une pièce cylindrique à face supérieure concave. Le centrage des différentes parties du moule est assuré par un système mécanique, constitué de goujons pour l'exemple choisi.

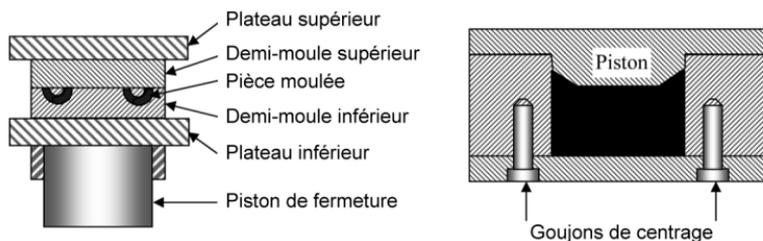


Figure 6.1 – Principe du moulage par compression.

Avantages du moulage par compression :

- presses et outillages de conception simple et robuste ;
- investissements réduits ;
- démarrages et arrêts rapides ;
- technique adaptée au laboratoire, à la réalisation de prototypes ;
- possibilité de mouler les très grosses pièces ;
- possibilité de fabriquer des pièces très longues en moulant des parties successives... ;
- possibilité de multiplier le nombre d'empreintes pour améliorer le rendement ;
- facilité d'utilisation d'inserts et renforts ;
- adaptation au moulage des caoutchoucs vulcanisables.

Inconvénients du moulage par compression :

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

- coûts de main-d'œuvre importants ;
- coûts d'exploitation élevés ;
- faibles possibilités d'automatisation.

6.1.2 Conception des moules

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

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

6.2 Moulage par compression-transfert

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

6.2.1 Principe du moulage par transfert ou compression-transfert

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

La presse peut être :

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

Le processus de moulage est simplifié, la main-d'œuvre est moins importante et les déchets sont réduits. En revanche, les investissements sont plus importants. La figure 6.2 schématise, sur la vue de gauche, le principe de la presse transfert avec ses deux pistons, l'un pour la fermeture du moule et l'autre pour le transfert du compound (figuré en noir) de la chambre ou pot de transfert vers les empreintes par l'intermédiaire des buses et canaux. La vue de droite représente un moule piston à monter sur une presse compression classique à un seul piston. La fermeture du moule chasse le polymère (figuré en noir) de la chambre ou pot de transfert vers les empreintes par l'intermédiaire des buses et canaux.

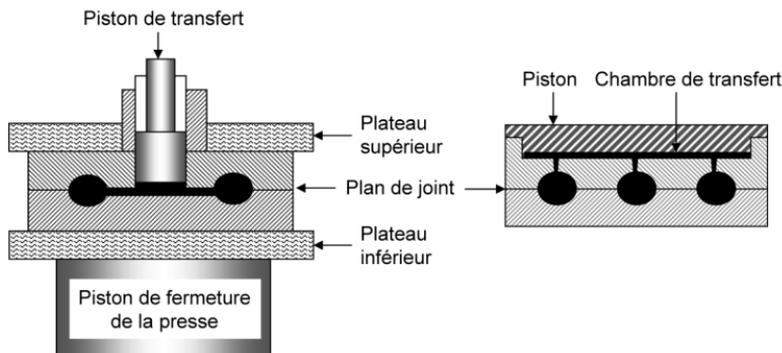


Figure 6.2 – Principe du moulage par compression-transfert.

6.2.2 Avantages et inconvénients du moulage par transfert

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

- une seule ébauche très simple à réaliser quel que soit le nombre d'empreintes du moule ;

- le transfert de la matière, du pot de transfert dans les empreintes du moule, provoque un travail mécanique complémentaire qui entraîne un échauffement plus homogène favorisant la soudure des flux et, dans le cas des thermodurcissables, l'isotropie de la réticulation. l'adhésion aux inserts est également améliorée ;
- le remplissage de toutes les empreintes se fait au même moment dans les mêmes conditions ;
- l'absence de bavures aux plans de joint permet de supprimer l'ébavurage ;
- l'état rhéologique du mélange retravaillé et réchauffé permet le remplissage d'empreintes de formes plus complexes ;
- le nombre d'empreintes peut être aussi plus important du fait de la facilité de chargement.

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

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

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

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

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

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

6.3 Les presses

Toute presse comporte au moins trois sous-ensembles :

- un ensemble mécanique, robuste et rigide, adapté aux efforts engendrés par les forces de fermeture et la mise en pression des compounds dans le moule. Il comporte essentiellement un bâti, un système de fermeture et des plateaux chauffants et/ou refroidissants dont l'un est fixe et l'autre mobile ;
- un ensemble hydraulique qui peut éventuellement être commun à plusieurs presses et qui fournit l'énergie nécessaire au système de fermeture ;
- un ensemble de commande et de contrôle plus ou moins automatisé.

6.3.1 Les bâtis

Plusieurs principes coexistent avec leurs avantages et inconvénients. Citons quelques exemples :

- les presses à colonnes (figure 6.3, vue de gauche) : le plateau mobile se déplace entre quatre colonnes en acier solidement fixées à la base et à la partie supérieure sur des plaques métalliques très épaisses, appelées « sommiers ». Généralement, des renforts sont utilisés pour accroître la rigidité. L'accessibilité au moule est limitée ;
- les presses col de cygne ont un bâti largement ouvert sur la face avant. L'accessibilité est bonne sur trois côtés mais la rigidité est plus faible ;
- les presses à mailles, dans lesquelles le bâti modulaire est constitué de cadres rectangulaires en tôle épaisse, appelés « mailles », réunis par des entretoises mécano-soudées ou vissées. En multipliant le nombre de mailles, il est possible de réaliser des presses de grande longueur (jusqu'à 10 m) pour mouler les bandes transporteuses par longueurs successives ;
- les presses à flasques sont constituées de deux flasques latérales reliées par des entretoises afin de laisser l'accès libre aux plateaux ;
- les presses « crocodiles » à plateau supérieur basculant : le plateau supérieur pivote sur un axe, dégageant largement la face avant et la partie inférieure du moule ;
- les presses autoclaves sont des presses classiques construites à l'intérieur d'un autoclave. Elles permettent une bonne homogénéité thermique, la vapeur chauffant tout le moule à la même température contrairement à un moule très haut sur une presse classique ;
- les presses multiplateaux (figure 6.3, vue de droite) comportent plusieurs plateaux qui permettent d'utiliser plusieurs moules identiques.

La figure 6.3 illustre les principes d'une presse à colonnes conventionnelle et d'une presse multiplateaux.

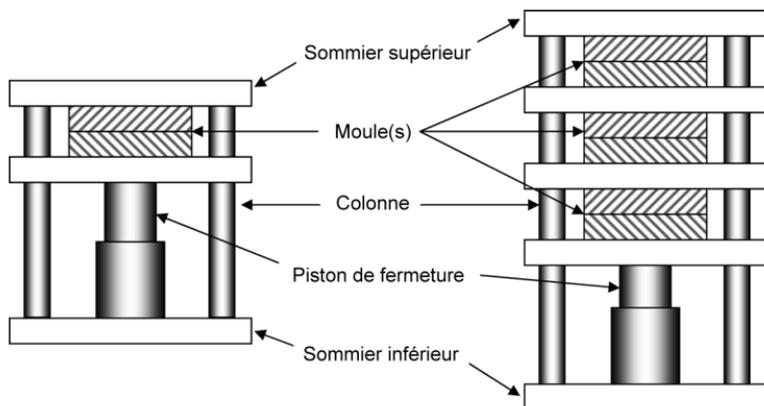


Figure 6.3 – Principes d'une presse à colonnes (à gauche) et d'une presse multiplateaux (à droite).

6.3.2 Les systèmes de fermeture

Le bâti est équipé d'un système de fermeture assurant à la fois le déplacement du plateau mobile et l'application de la force de moulage. Il existe deux types principaux de fermetures :

- fermeture par vérin, le plus utilisé sur les presses à compression et compression-transfert ;
- fermeture à vis sur des presses à compression anciennes ou spéciales.

Le système de fermeture par vérin sur presses à compression et compression-transfert (voir figures 6.1, 6.2 et 6.3) utilise un vérin hydraulique, à simple ou double effet, fixé, en général, au centre de la partie inférieure du bâti, la tige du piston actionnant le plateau mobile :

- le piston repousse le plateau mobile et la moitié du moule qui y est fixée jusqu'à ce que le contact soit établi avec la partie supérieure du moule, qui est généralement fixée sur le plateau chauffant fixe ;
- la pression fait fluier le matériau à mouler dans l'empreinte et le moule se ferme ;

- la presse, en position fermée et verrouillée, maintient la pression sur le mélange jusqu'à la fin du cycle de moulage ;
- les vérins à double effet commandent également l'ouverture de la presse. Dans le cas des vérins à simple effet, la presse s'ouvre sous l'action du poids des parties mobiles et, éventuellement, grâce à des ressorts de rappel. Ce système est moins efficace.

Bien que généralement fixé sous le plateau du bas, le vérin peut aussi être placé au-dessus du plateau supérieur.

Certaines presses utilisent deux vérins de plus faible section mais à longue course, placés latéralement. Ils permettent une fermeture et une ouverture plus rapide de la presse qu'avec le seul vérin principal.

Les presses sont souvent désignées par la force maximale que le vérin principal peut développer. La gamme des forces de fermeture est très étendue, par exemple de quelques tonnes à 5 000 t et plus...

6.3.3 Le système hydraulique

L'ensemble hydraulique peut desservir plusieurs presses ou être dédié à une seule presse. Il se compose de deux pompes électriques immergées dans le réservoir de fluide hydraulique, l'une à basse pression (1 à 2 MPa) et grand débit pour assurer la fermeture et l'ouverture des plateaux à grande vitesse, l'autre à haute pression (20 à 25 MPa) et faible débit pour réaliser l'accostage à faible vitesse et le verrouillage des plateaux. Le reste de l'installation comprend des distributeurs qui assurent le passage d'une pompe à l'autre, un accumulateur, généralement hydropneumatique, des accessoires tels que les clapets anti-retour...

6.3.4 Le système de chauffage

Si le moule n'est pas chauffé, la transmission de chaleur se fait par les plateaux, principalement par conduction, ce qui entraîne des problèmes d'homogénéité thermique pour les moules hauts par rapport à leur surface en contact avec les plateaux. De plus, la vitesse d'échauffement du moule diminue au fur et à mesure que sa température s'élève et se rapproche de celle des plateaux. L'équilibre thermique est donc très long à obtenir. Accessoirement, une certaine contribution peut être fournie par convection, mais l'air est mauvais conducteur, ou par rayonnement.

La mesure de la température est évidemment un point important et est d'autant plus précise et utile que la sonde est située le plus près possible du mélange ou de préférence dans le moule, aussi près que possible de l'empreinte. Les plateaux peuvent être chauffés par des résistances électriques situées à l'intérieur des plateaux ou par circulation d'un fluide caloporteur (vapeur, eau surchauffée ou huile) dans des canaux usinés dans les plateaux près de la surface recevant le moule.

Le chauffage par résistance électrique utilise souvent des cartouches cylindriques ou crayons chauffants peu onéreux et faciles à installer mais le contact résistance/métal du moule est imparfait et, en conséquence, le rendement thermique est faible. Les résistances plates blindées sont plus chères et nécessitent un usinage plus onéreux des plateaux mais le contact résistance/métal du moule est meilleur et le chauffage également.

Les avantages du chauffage électrique sont sa souplesse de fonctionnement, la parfaite autonomie des presses et la facilité d'obtention de températures supérieures à 200 °C. En revanche, l'amplitude de régulation des températures est importante, la consommation électrique est élevée, le coût total des systèmes de régulation qui doivent équiper chaque plateau est élevé. Le chauffage par induction des plateaux, analogue à celui des plaques de cuisson domestiques, constitue une autre alternative qui se développe.

La vapeur, solution la plus ancienne, nécessite une installation complexe : chaudière, circuit d'alimentation, purgeurs, détendeurs, manomètres, vannes... Chaque plateau est alimenté en parallèle. Les plateaux mobiles doivent être alimentés soit par des tubes rigides articulés, soit par des tubes flexibles recouverts d'une tresse métallique.

Les avantages sont la puissance de chauffe importante, le faible coût de consommation, la mise en température très rapide des plateaux, la bonne homogénéité de la température sur toute la surface des plateaux (± 3 °C). En revanche, l'installation est relativement importante et d'un coût élevé, la maintenance et la surveillance sont importantes, les risques de fuites et de brûlures ne doivent pas être négligés et nécessitent des précautions.

L'eau surchauffée est moins corrosive que la vapeur mais plus onéreuse.

Les unités de chauffage indépendantes par circulation d'huile caloporteuse présentent l'avantage d'être installées près de la presse avec une tuyauterie d'alimentation très courte et offrent une régulation précise de la température ainsi qu'une faible inertie due au faible volume de liquide à chauffer. En revanche, le coût de chauffage est plus élevé et les risques de fuites et de brûlures ne doivent pas être négligés et nécessitent des précautions.

6.3.5 Les accessoires et périphériques

Les presses peuvent comporter différents accessoires et périphériques pour améliorer la productivité et la qualité des produits moulés, par exemple :

- cloches ou enceintes à vide particulièrement adaptées au moulage des pièces très techniques. Cette technologie diminue les risques d'inclusions d'air et les rebuts, facilite l'écoulement de la matière et sa réticulation, réduit l'encrassement des moules grâce à une plus faible oxydation par l'oxygène résiduel de l'air ;
- pastilleuses et machines de préparation des ébauches ;
- systèmes d'éjection ;
- manipulateurs, chargement et déchargement automatisés ;
- logiciels d'aide à la conduite des presses...

Des logiciels sont proposés pour optimiser la productivité et la qualité des productions. Ils sont plus ou moins complexes suivant les exigences de l'utilisateur, le type de presse et la nature des produits à mouler, les thermodurcissables nécessitant, en plus, la gestion de l'équilibre mise en forme/état de réticulation. Par exemple, REP propose pour ses presses :

- un système de régulation en boucle fermée assurant un réglage précis et une bonne reproductibilité dans le temps des consignes de réglage ;
- le calcul automatique des coefficients PID de régulation de température du moule permettant d'augmenter la productivité tout en assurant une qualité constante des pièces moulées ;
- une programmation du cycle par apprentissage permettant de passer rapidement et facilement d'une campagne de production à une autre.

6.3.6 Exemples de caractéristiques de presses

Les dimensionnements des presses, aussi bien d'un point de vue géométrique que mécanique et thermique, couvrent de larges plages dont quelques exemples figurent dans les tableaux 6.1, 6.2 et 6.3.

Tableau 6.1 – Exemples de caractéristiques de presses de force de fermeture comprise entre 15 et 250 t.

Force de fermeture (t)	15	50-60	100	200-250
Dimension des plateaux (mm × mm)	250 × 250	350 × 350	400 × 400	600 × 600
Nombre d'espaces inter-plateaux	1	1	1	1-18
Température maximale (°C)	400	400	400	400
Puissance de chauffe, (kW/plateau)	3	4-6	6-9	9-14
Pression maximale (kg/cm ²)	200	200	200	200
Mode de chauffage	Électricité	Électricité	Électricité Vapeur Thermo-fluide	Électricité Vapeur Thermo-fluide
Refroidissement	Possible	Possible	Possible	Possible
Poids de la presse (t)	1,2	2,5	4,5-5	8-9

Tableau 6.2 – Exemples de caractéristiques de presses de force de fermeture comprise entre 300 et 1 000 t.

Force de fermeture (t)	300	400	500	1 000
Dimension des plateaux (m × m)	0,8 × 0,8	0,9 × 0,9	1 × 1	1,5 × 1,5
Nombre d'espaces inter-plateaux	1	1	1	1
Température maximale (°C)	400	400	400	400
Puissance de chauffe (kW/plateau)	12-17	12-21	12-23	15-30
Pression maximale (kg/cm ²)	200	200	200	210

Tableau 6.2 – Exemples de caractéristiques de presses de force de fermeture comprise entre 300 et 1 000 t. (suite)

Mode de chauffage	Électricité Vapeur Thermo-fluide	Électricité Thermo-fluide	Électricité Thermo-fluide	Électricité Thermo-fluide
Refroidissement	Possible	Possible	Possible	Possible
Poids de la presse (t)	12-14	15-18	25	35-40

Tableau 6.3 – Exemples de caractéristiques de presses de force de fermeture comprise entre 1 500 et 5 000 t.

Force de fermeture (t)	1 500-1 600	2 500	3 000	5 000
Dimension des plateaux (m × m)	1,5 × 2	2 × 3	3 × 9	4 × 9
Nombre d'espaces inter-plateaux	1-8	1	1	1
Mode de chauffage	Électricité Vapeur Thermo-fluide	Électricité Thermo-fluide	Électricité Thermo-fluide	Électricité Thermo-fluide

6.3.7 Exemples de constructeurs et distributeurs de matériel

Le tableau 6.4 indique quelques constructeurs ou distributeurs de matériel.

Tableau 6.4 – Exemples de constructeurs ou distributeurs de matériel.

Société	Site Internet
Desma	www.desma-usa.com
Lescuyer Villeneuve	www.lescuyer-villeneuve.com
Flowmech	www.hydraulicpressnet.com
Lauffer	www.lauffer.de

Tableau 6.4 – Exemples de constructeurs ou distributeurs de matériel. (suite)

Société	Site Internet
LCM	www.hydraulic-press-lienchieh.com
Onapres	www.onapres.es
Pinette Emidecau	www.pinetteemidecau.eu
Rutil	www.rutil.com
Santec India	www.santecindia.com
Sacomat	www.rep.tm.fr
Scamex	www.scamex.fr
Steinl	www.lwb-steinl.us
Tungyu-REP	www.tungyu.com

6.4 Injection des thermodurcissables

Les thermodurcissables dans leur état définitif ont une structure tridimensionnelle obtenue par réaction chimique irréversible provoquée par la chaleur pendant la mise en forme par injection. Les thermodurcissables, du fait de cette réaction chimique irréversible de durcissement, présentent des difficultés spécifiques de mise en œuvre :

- utilisation de presses à injecter spécialement adaptées ;
- opérations de mise en forme souvent plus délicates, car il faut prendre soin de réaliser un équilibre difficile entre l'état d'avancement de la réaction de durcissement et la mise en forme ;
- cycles de transformation plus longs et plus gourmands en énergie ;
- coûts de mise en œuvre souvent plus élevés à méthode de transformation identique, mais il existe des exceptions si l'on peut changer de procédé de transformation et passer, par exemple, au moulage par coulée pour certaines familles de thermodurcissables ;
- dégagement de gaz, notamment de la vapeur d'eau, pendant le durcissement de certains polymères.

En revanche, la réticulation offre des avantages particuliers en assurant une meilleure conservation des modules en température, une meilleure tenue au fluage car les liaisons entre chaînes s'opposent au glissement des molécules les unes par rapport aux autres, et une décomposition par la chaleur sans repasser par l'état liquide, ce qui améliore certains aspects du comportement au feu.

Les thermodurcissables monolithiques, ou « homogènes », contenant de la résine pure, les additifs liquides ou en poudre nécessaires à la formulation et, éventuellement des charges minérales ou fibreuses de faibles dimensions, peuvent être moulés par injection mais, contrairement aux thermoplastiques examinés précédemment, ils doivent être réticulés après la mise en forme et avant démoulage.

La chaleur nécessaire à la fusion et plastification des polymères provoque également la réticulation des thermodurcissables, qui entraîne des modifications du comportement rhéologique empêchant la mise en forme correcte. La principale difficulté de l'injection des thermodurcissables réside donc dans le délicat équilibre à obtenir pour finir la mise en forme avant que l'avancement de la réticulation ne modifie trop les propriétés rhéologiques et empêche de ce fait la mise en forme. La figure 6.4 schématise les conditions optimales de réticulation dépendant du couple temps/température tandis que la figure 6.5 schématise l'évolution de la moulabilité en fonction du taux de réticulation réellement atteint à l'instant considéré.

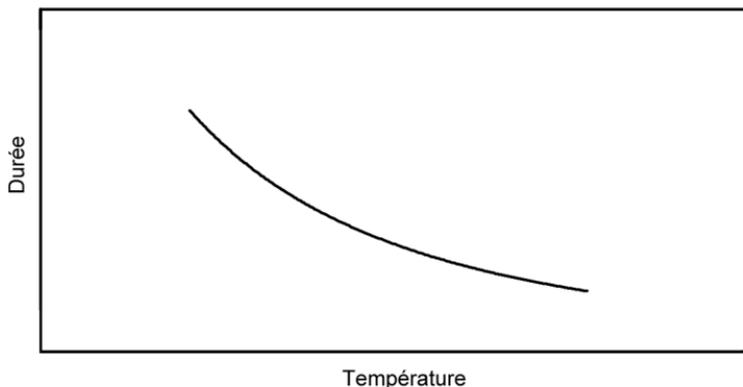


Figure 6.4 – Temps de réticulation en fonction de la température.

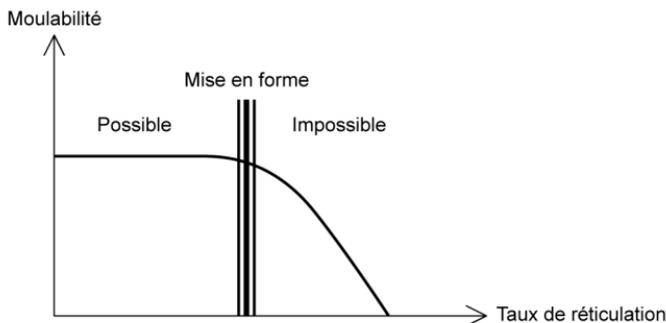


Figure 6.5 – Moulabilité en fonction de la réticulation.

Certains constructeurs de presses à injection des thermoplastiques proposent également des modèles pour les thermodurcissables soit en adaptant les unités d'injection, soit en construisant des modèles spécifiques. Les unités d'injection utilisent généralement des vis plus courtes avec une faible compression et des systèmes anti-retour spéciaux, des fourreaux refroidis. Les systèmes de contrôle des paramètres de mise en œuvre et les logiciels d'aide à la conduite peuvent également être adaptés.

Le tableau 6.5 indique quelques caractéristiques de presses à injecter spécialement construites pour les thermodurcissables.

Tableau 6.5 – Exemples de caractéristiques de presses à injecter les thermodurcissables (source Toshiba).

Diamètre de vis (mm)	32	40	45	50	55
Poids injecté (UP) (g)	110	195	305	470	570
Pression d'injection (MPa)	199	159	155	201	166
Capacité de plastification (kg/h)	40	60	77	90	105
Force de fermeture (kN)	760	1 010	1 260	2 150	2 150

Quel que soit le matériel utilisé, les conditions d'injection doivent être adaptées, avec des températures faibles, par exemple 70-100 °C, pour les premières étapes d'injection de façon à ménager la moulabilité, et, au

contraire, des températures élevées, par exemple 150-190 °C ou plus, pour le moule de façon à assurer un état de réticulation suffisant. Le tableau 6.6 indique quelques constructeurs ou distributeurs de matériel.

Tableau 6.6 – Exemples de constructeurs ou distributeurs de matériel.

Société	Site Internet
Arburg	www.arburg.com
Battenfeld	www.battenfeld-int.com .
Billion	www.billion.fr
Demag	www.sumitomo-demag.com
Engel	www.engelglobal.com
Nissei	www.nisseijushi.co.jp et www.nisseiamerica.com
REP	www.rep.tm.fr
Sumitomo	www.sumitomopm.com et www.shi.co.jp/plastics
Sumitomo Demag	www.sumitomo-demag.com
Toshiba	www.toshiba-machine.co.jp

6.5 Rotomoulage, *slush moulding*

Le rotomoulage, ou moulage par rotation, est un procédé de fabrication de corps creux (figure 6.6) qui utilise la chaleur et la force centrifuge pour fondre et mouler le polymère sur la surface interne d'un moule. Les principales étapes consistent à :

- introduire dans un moule froid la quantité de résine nécessaire sous forme liquide ou pulvérulente ;
- mettre le moule en rotation suivant un ou deux axes perpendiculaires dans un four chauffé entre 200 et 450 °C suivant le matériau utilisé. Sous l'effet de la force centrifuge, le matériau est plaqué contre les parois internes du moule, où il gélifie (plastisols) ou fond (poudres de PE ou PA) pour former une paroi continue ;
- refroidir le moule en le maintenant en rotation pour assurer la solidification de la pièce ;
- démouler.

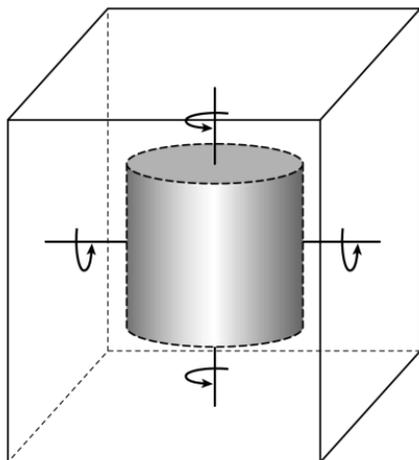


Figure 6.6 – Principe du rotomoulage.

Outre les dimensions des systèmes de chauffage et leur capacité thermique, les machines diffèrent par la conception mécanique, le type de disposition (carrousel, linéaire...), le nombre de postes, d'axes et de bras, le contrôle machine plus ou moins perfectionné et convivial, le moyen de chauffage (souvent de l'air chaud). La pulvérisation de sel fondu, les infrarouges et la circulation de fluides caloporteurs dans la jaquette des moules peuvent également être utilisés. Le refroidissement des moules se fait généralement à l'eau. Le tableau 6.7 indique quelques exemples d'installations pour pièces de grand volume.

Tableau 6.7 – Exemples d'installations pour pièces de grand volume.

Diamètre (m)	Capacité maximale (kg)	Puissance gaz (kW)	Nombre de bras
2,3	1 000	180	2-3
3	1 200	300	2-3
4	2 000	600	2-3
5	2 500	800	2-3
5,5	2 500	900	2-3

Théoriquement, tous les thermoplastiques pourraient être transformés par rotomoulage mais, pour les polymères solides, il faut que les grains de matière se ressoudent convenablement, sinon les pièces sont cassantes. Pratiquement, le choix des matières est limité. Les plus couramment utilisées sont des grades spéciaux de PE, PA, PVC, PC, TPU, TPO en poudre, les plastisols (pâtes de PVC fortement plastifié), des polyamides ou polyesters insaturés liquides.

Les avantages du procédé concernent :

- l'aptitude à la fabrication de pièces de toutes tailles jusqu'à des réservoirs de 75 000 l et plus ;
- l'absence de contraintes résiduelles et de lignes de soudure ;
- l'aspect extérieur correct sur toute la surface de la pièce ;
- le coût modéré des moules et outillages ;
- les investissements raisonnables ;
- l'aptitude aux petites et moyennes séries ;
- l'isotropie des pièces si leur forme se prête à une répartition homogène de la matière.

Les inconvénients du procédé concernent :

- la discontinuité pour les matériels les plus simples, la relative lenteur, la forte main-d'œuvre nécessaire ;
- pour les matériaux mis en œuvre à partir de poudre, l'obligation de surdimensionner les épaisseurs due à l'absence de pression et de cisaillement au moment de la fusion, ce qui empêche la bonne interpénétration des grains et entraîne une moindre cohésion de la matière. En conséquence, les propriétés mécaniques sont inférieures à celles obtenues par moulage sous pression ;
- la difficulté à mouler les faibles épaisseurs ;
- le choix restreint des matériaux et grades ;
- la nécessité d'opérer des finitions.

Le moulage par embouage, ou *slush moulding*, consiste à déposer sur la face intérieure d'un moule chaud de la poudre du plastique à mouler, par exemple PVC (polychlorure de vinyle) ou TPU (thermoplastique uréthane). La chaleur du moule fait fondre par contact une fine couche de polymère. Après refroidissement, une « peau » peut ainsi être obtenue reproduisant fidèlement la surface interne du moule. Le moulage par embouage se rapproche du rotomoulage mais s'en distingue par le fait que la poudre de polymère à mouler est introduite en excès dans le moule chauffé préalablement.

Une variante permet de doubler la peau obtenue avec un compound expansé.

Le moulage par embouage permet d'obtenir des peaux d'excellente qualité (liberté de forme, bonnes propriétés mécaniques, tenue au vieillissement), sans contraintes internes, avec une bonne reproductibilité du grain.

Pour les intérieurs automobiles, les peaux en PVC plastifié peuvent être fabriquées avec cette technique pour obtenir des tableaux de bord (plusieurs millions d'exemplaires annuellement pour des véhicules d'entrée de gamme ou de gamme supérieure), des contre-portes, des consoles centrales. La méthode est également utilisée pour la fabrication de poupées, ballons, figurines, objets de puériculture, articles chaussants, prothèses...

À titre indicatif, l'ordre de grandeur du prix d'une machine peut varier entre 0,5 et 1,5 M€ chez un même constructeur, avec des durées de cycle de 1 à 5 min. La puissance de chauffe peut être par exemple de 550 kW et la motorisation de 50 kW.

Le tableau 6.8 indique quelques exemples de constructeurs de matériel.

Tableau 6.8 – Exemples de constructeurs ou distributeurs de matériel.

Société	Site Internet
Fixopan	www.fixopanglobal.com
Nakata-Coating	www.nakata-coating.co.jp
RotoMachinery Group	www.rotomachinery.com
SAT	www.sat-thermique.com
SMCA	www.1machine.net

6.6 Calandrage

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

6.6.1 Principe du calandrage

Cette technique est généralement employée pour produire des feuilles et des films de thermoplastiques tels que PVC rigide et souple, EVA, polypropylène,

ABS... d'épaisseur minimale de l'ordre de 25 μm . Le principe schématisé par la figure 6.7 consiste à :

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

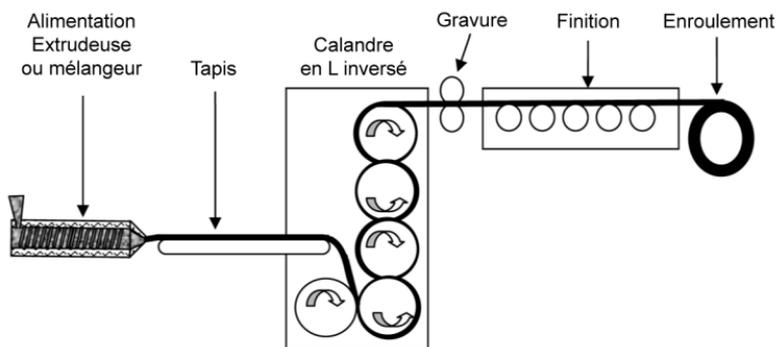


Figure 6.7 – Principe du calandrage.

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

- champ d'application : par exemple feuille, film, PVC rigide ou souple... ;
- 2 à 7 cylindres ;
- 400 à 900 mm de diamètre de cylindre ;
- 0,8 à 3 m ou plus de longueur de table (longueur des cylindres) ;
- configuration en I, L, L inversé, F, Z... (figure 6.8) ;
- motorisation : la puissance installée et les vitesses linéaires peuvent être différentes pour deux cylindres tangents afin de créer une friction favorable à la plastification du polymère et, éventuellement, à sa pénétration dans les tissus ou nappes. Pour un film de PVC plastifié défilant à 100 m/min, la puissance des moteurs indiquée par certaines sources est de l'ordre de 50 à 100 kW pour une calandre 4 cylindres ;

- possibilité de réglage des épaisseurs par « *cross-axing* », ou croisement des axes des cylindres, et « *roll-bending* », ou cintrage de cylindre.

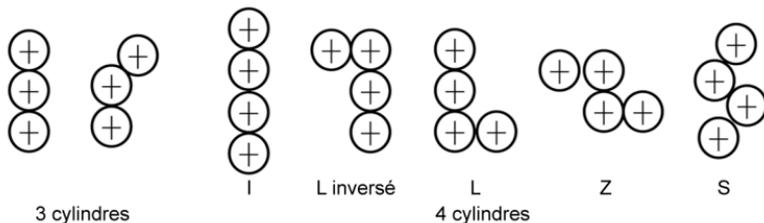


Figure 6.8 – Exemples de configurations de calandres 3 et 4 cylindres.

La figure 6.9 montre deux exemples de calandres avec l'armoire et le pupitre de commande ainsi que le bâti des matériels suiveurs.

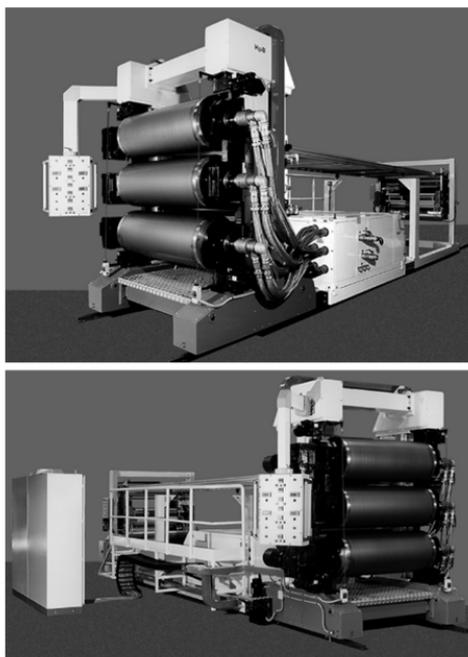


Figure 6.9 – Exemples de calandres (avec l'aimable autorisation de HPB Équipement).

Le tableau 6.9 indique quelques exemples de caractéristiques de calandres pour feuilles d'emballage d'épaisseur 0,3 à 1,5 mm en PP, PS, PE et PET. Les mêmes matériels peuvent également calandrer des plaques d'ABS, de PS choc, PE, PC après quelques adaptations.

Tableau 6.9 – Exemples de caractéristiques de calandres pour feuilles d'emballage (d'après HPB Équipement).

Type d'application	Fabrication de feuilles d'emballage d'épaisseur 0,3 à 1,5 mm en PP, PS, PE et PET				
	800	1 200	1 600	2 000	2 200
Largeur de table (mm)	800	1 200	1 600	2 000	2 200
Diamètre cylindres (mm)	600	600	600	600	600
Serrage (t)	13	19	25	31	34
Puissance (kW)	4	4	4	6	6
Température maximale (°C)	150	150	150	150	150
Vitesse linéaire (m/min)	35	35	35	35	35

D'une façon générale :

- les calandres sont des machines très spécifiques nécessitant des investissements lourds qui sont utilisées seulement pour des productions à fort rendement ;
- les largeurs sont dans une gamme de 0,8 à 3 m ;
- il est nécessaire de couper les bordures qui sont hors spécifications ;
- la longueur est pratiquement illimitée, avec comme seule contrainte la capacité d'enroulement ;
- les possibilités d'arrangement des renforts sont limitées : il est seulement possible de calandrer le thermoplastique ou le caoutchouc sur des supports souples, continus et résistants dans le sens machine pour obtenir le renforcement ;
- il est possible de calandrer deux thermoplastiques différents pour fabriquer des feuilles bicouches ;
- les films et les feuilles sont souvent anisotropes, les propriétés étant différentes dans le sens machine et le sens transversal. L'étirage augmente les

- performances dans le sens machine sauf exception pour les allongements à la rupture ;
- l'aspect en sortie de ligne de calandrage est correct et permet l'utilisation sans autre opération.

6.6.2 Les lignes de calandrage

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

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

6.6.3 Doublage, enduction, gommage, frictionnage

Les calandres comportant un nombre de cylindres suffisant et les accessoires nécessaires au déroulement des tissus, nappes et autres supports permettent la fabrication de double-couches et de substrats enduits simple ou double face comme le montre la figure 6.10. Le substrat, figuré en gris, est enduit avec une couche de polymère, figuré en noir, sur une face (vue de gauche) ou sur les deux faces (vue de droite).

Les substrats peuvent être des films ou feuilles, des nappes et tissus textiles ou métalliques.

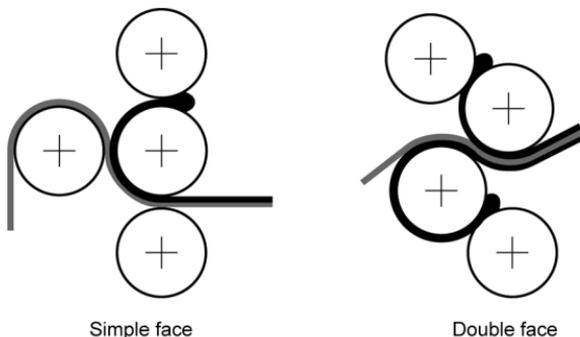


Figure 6.10 – Principe de l'enduction simple et double face.

6.6.4 Exemples de constructeurs et distributeurs de matériel

Le tableau 6.10 indique quelques constructeurs ou distributeurs de matériel.

Tableau 6.10 – Exemples de constructeurs ou distributeurs de matériel.

Société	Site Internet
Collin	www.drcollin.de
Comerio Ercole S.p.A	www.comerco.it
HPB Équipement	www.hpb-equipement.fr
Mc Neil Akron Repiquet	www.mcneil-repiqueur.fr
Qingdao Fushun Plastic Machinery Co.	www.china-fushun.com
Rodolfo Comerio	www.comerio.it
Yvroud	www.yvroud.fr
Zhangjiagang Weida Machinery Co.	zjgwd.en.alibaba.com

7 • TRANSFORMATION DES COMPOSITES

Pour situer l'importance des composites, rappelons qu'ils représentent quelques pour cent en poids des plastiques avec un prix au kilogramme nettement supérieur à la moyenne des matières plastiques. La figure 7.1 montre la suprématie des SMC et des TRE, ou GMT, suivis du moulage au contact, manuel ou par projection simultanée, puis des BMC, différents types de moulage, l'enroulement filamentaire et la pultrusion.

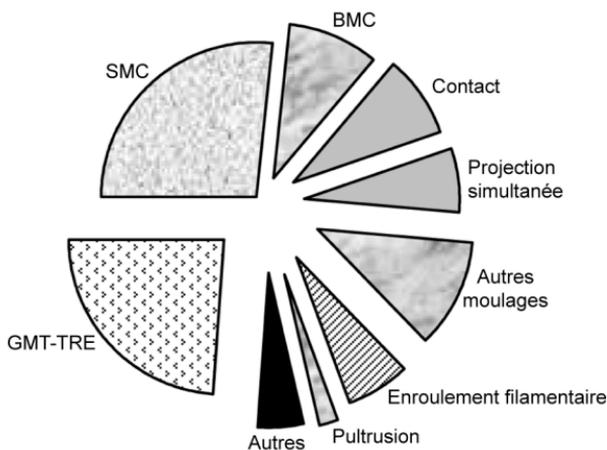


Figure 7.1 – Parts de marché des procédés de transformation des composites.

La transformation des composites utilise :

- des procédés conventionnels déjà décrits dans les chapitres précédents avec, éventuellement quelques adaptations, par exemple moulage par compression ou injection ;
- des procédés spécifiques comme le moulage au contact, l'enroulement filaire, le drapage, etc.

Enfin, il faut noter que beaucoup de formes de présentation des composites sont différentes de celles des résines. Rappelons les principales :

- les compounds en vrac renforcés par fils ou par *rovings* coupés. La livraison se fait en vrac ou en feuilles analogues aux SMC. On peut rencontrer de multiples formes telles que :
 - premix, ou DMC (Dough Moulding Compound), encore appelé familièrement « choucroute » : masse pâteuse de résine thermodurcissable stabilisée non durcie et de renforts coupés,
 - BMC (Bulk Moulding Compound), ou DMC contenant un épaississant pour améliorer le remplissage des moules,
 - AMC (Alkyde Moulding Compound) : BMC dans lequel le styrène est remplacé par le diallylphtalate,
 - TMC (Thick Moulding Compound) : compound en vrac fabriqué en continu et présenté en feuilles épaisses,
 - CIC (compound imprégné en continu) : compound en vrac fabriqué en continu et présenté en vrac ;
- les SMC (Sheet Moulding Compounds) sont des feuilles de résine thermodurcissable stabilisée non durcie, renforcées par des fibres de verre coupées et protégées en surface par deux films plastiques qui sont enlevés avant moulage. Les SMC à très fort taux de verre sont encore appelés HMC (High Modulus Compounds) en raison des hautes propriétés obtenues. Souvent à base de résines polyesters insaturés, les SMC peuvent être également à matrice vinylester, phénolique, époxyde... ;
- les préimprégnés, ou prepregs, sont constitués de toutes formes de renforts, tissus, *rovings*, rubans, etc. (en fibres de verre, aramide ou carbone), imprégnés de résines non durcies, en général des époxydes mais également des polyesters, des polyimides ou encore des thermoplastiques. Les préimprégnés présentés en rubans ou bandes ou profilés de fibres continues unidirectionnelles imprégnées de résine thermoplastique compacte conduisent, par rubannage, formage, drapage, etc., à des pièces d'excellentes performances. Éventuellement, les rubans peuvent être découpés en petits carrés ou pellets

- utilisables en injection pour obtenir un renforcement intermédiaire entre le polymère chargé fibre courte et le ruban imprégné polymère ;
- les TRE (Thermoplastiques Renforcés Estampables), ou GMT (Glass Mat Thermoplastics), sont des plaques de résine thermoplastique compacte renforcée de mat de fibres et, éventuellement, de fibres continues unidirectionnelles. Les pièces fabriquées par estampage ont de bonnes propriétés mécaniques.

Les composites à matrice thermoplastique nécessitent seulement une consolidation après mise en forme alors que ceux à matrice thermodurcissable nécessitent en plus une réticulation à température ambiante ou à chaud. Parmi les nombreux procédés, le tableau 7.1 propose un classement en fonction du type de procédé et de la nature de la résine. D'autres classements et d'autres procédés peuvent être rencontrés par ailleurs. Les classements entre petite, moyenne et grande séries ne sont pas rigides et souffrent de nombreuses exceptions.

Tableau 7.1 – Proposition de classement de différents procédés.

Thermodurcissables	Thermoplastiques
Petite série	
Contact manuel et simultané	Moulage au sac sous vide
Drapage direct Drapage de préimprégnés	Drapage de préimprégnés
Coulée de résine	
Moyenne série	
RTM (Resin Transfer Moulding), VARI, Vac Flo	Estampage formage
RIM, RRIM, SRIM (Reaction Injection Moulding ; Reinforced, Structural RIM)	Thermoformage au diaphragme
Infusion de résine liquide (Scrimp, RIFT, VARTM) RFI (Resin Film Impregnation)	Extrusion compression
Compression à froid	
Drapage direct ou de préimprégnés	Drapage de préimprégnés
Enroulement filamentaire	Enroulement filamentaire
Moulage par centrifugation	

Tableau 7.1 – Proposition de classement de différents procédés. (suite)

Thermodurcissables	Thermoplastiques
Grande série	
LFI (Long Fibre Injection)	GMT (Glass Mat Reinforced Thermoplastics), ou TRE (Thermoplastiques Renforcés Estampables)
SMC (Sheet Moulding Compound)	Injection ou compression de LFT
BMC (Bulk Moulding Compound)	Fabrication directe de LFT puis injection ou compression
	Co-moulage de GMT et de LFT
Procédés continus	
Stratification de panneaux sandwichs	Stratification de panneaux sandwichs
Pultrusion	Pultrusion
Stratification continue de feuilles et plaques	Pulextrusion
Enroulement filamentaire continu (Drostholm)	

7.1 Moulage par compression

7.1.1 Moulage par compression à chaud

Ce processus utilise une presse et un moule à compression. Il y a trois alternatives principales :

- placement d'une préforme de SMC dans le moule chaud ;
- remplissage du moule avec une quantité appropriée de BMC ou autre premix ;
- placement d'une préforme appropriée dans le moule puis remplissage du moule avec la quantité nécessaire de résine thermodurcissable liquide.

Bien que le chauffage du moule accélère la réticulation de la résine, le temps de cycle doit être suffisant pour assurer la réticulation optimale. Les moules doivent être adaptés à la température de durcissement.

La méthode de moulage par compression, les presses et les moules ont été décrits aux paragraphes 6.1 et 6.3.

Les avantages du procédé résident dans la rapidité des cycles de production, d'autant que la température du moule est plus élevée. Ce type de méthode est adapté aux productions en série pour l'automobile par exemple. La compression à chaud assure un bon aspect sur toute la surface de la pièce et permet un compactage efficace du composite, sans vides et avec une bonne interpénétration fibres/matrice, conduisant aux propriétés mécaniques optimales.

Les inconvénients du procédé concernent les investissements importants, le coût des moules, la nécessité de préparer les renforts et de les disposer correctement. La technique est appliquée, par exemple, dans l'automobile pour la fabrication de pare-chocs, boucliers, écrans, éléments de portes et capots ou encore en électrotechnique pour la réalisation de coffrets, habillages, etc.

7.1.2 Moulage par compression à froid

La compression à froid utilise, comme précédemment, une presse à compression et un moule mais le moulage a lieu à température ambiante, ce qui allonge les durées de cycle mais simplifie la conception des moules et permet leur réalisation en composite. Le cycle de moulage comprend les étapes principales suivantes :

- application d'un *gelcoat* sur toutes les parties du moule qui seront en contact avec la pièce ;
- mise en place du renfort convenablement préformé ;
- remplissage du moule avec la quantité nécessaire de résine thermodurcissable liquide ;
- fermeture de la presse, mise en compression du moule sous pression limitée pendant le temps nécessaire au durcissement, plus long du fait que la presse et le moule ne sont pas chauffés.

La productivité est intermédiaire entre la compression à chaud et le moulage par contact.

Les avantages du procédé résident dans la faible pression et la réticulation à température ambiante, qui permettent l'utilisation de moules simplifiés, moins onéreux et qui peuvent être construits en interne en utilisant des composites. La compression assure un bon aspect sur toute la surface de la pièce et permet un compactage efficace du composite, sans vides et avec une bonne interpénétration fibres/matrice, conduisant à de bonnes propriétés mécaniques.

Les inconvénients du procédé concernent les investissements importants dans la presse, la nécessité de préparer les renforts et de les disposer correctement, la longueur des durées de cycle due à la faible température. La réticulation à

température ambiante peut affecter le niveau des performances mécaniques, qui peuvent être inférieures à celles obtenue à chaud.

La technique est appliquée, par exemple, dans les transports pour la fabrication en série limitée de pièces pour des éléments de carrosserie de poids lourds ou caravanes, pour la fabrication de petites embarcations, de panneaux extérieurs pour le bâtiment, de baignoires, bac à douche, etc.

7.2 Moulage au contact

Le moulage au contact est le procédé le plus ancien mais est toujours utilisé car il demande peu de moyens, se prête bien à la réalisation de très grandes pièces et à une mise en œuvre artisanale ou en petite série.

La technique originale a donné naissance à plusieurs variantes concernant la fabrication et la réticulation des pièces :

- stratification manuelle sur moule ouvert et réticulation à température ambiante ;
- projection simultanée sur moule ouvert et réticulation à température ambiante ;
- réticulation à chaud :
 - au sac sous vide,
 - au sac sous pression,
 - par moulage en compression en moule fermé.

7.2.1 Principe du moulage au contact simple

La technique consiste à déposer, sur un moule ouvert, de la résine et des renforts en couches successives comme le montre la figure 7.2. Le moule peut être :

- en creux (négatif, ou femelle) : la face externe directement au contact du moule aura le meilleur aspect ;
- en relief (positif, ou mâle) : la face interne directement au contact du moule aura le meilleur aspect.

Le cycle de fabrication comprend :

- dépôt du *gelcoat*, couche de résine spécifique destinée à donner un bel aspect et la teinte de surface tout en protégeant le composite contre le vieillissement et les agressions chimiques et mécaniques ;
- dépôt des couches successives de résine et de renforts (mats, tissus...) en

- prenant soin d'imprégner correctement les renforts sans faire de bulles, cloques, etc. ;
- dépôt du *top coat*, couche de résine destinée à protéger le composite sur la face opposée au *gelcoat*. Cette face est, en général, inesthétique ;
 - réticulation, d'abord à température ambiante, dans le moule jusqu'à obtention de propriétés mécaniques suffisantes pour permettre le démoulage ;
 - démoulage ;
 - poursuite du durcissement hors du moule, sans contrainte, à température ambiante ou éventuellement à une température modérée, par exemple 70 °C, pour accélérer la réticulation.

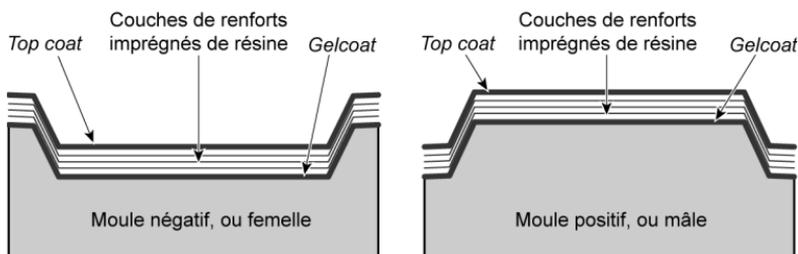


Figure 7.2 – Principe du moulage au contact.

La mise en place des renforts, souvent des mats à fils coupés et des tissus de *roving*, est manuelle et la résine est déposée au pinceau, au rouleau ou au pistolet. La résine ayant du retrait, il faut prévoir une dépouille ou un moule adapté pour pouvoir démouler.

Une variante du procédé utilise un noyau à la place du moule. La stratification s'effectue d'abord sur une face du noyau puis, après retournement et enlèvement ou non du noyau, la stratification s'effectue sur la deuxième face. Les avantages du procédé résident dans la simplicité et le faible coût des moules et outillages, la grande liberté de formes, la possibilité de très grandes pièces telles que les bateaux, la possibilité de pièces épaisses puisqu'il suffit de déposer le nombre de couches de renforts et de résine, l'aptitude à la réalisation de prototypes et de petites séries y compris de pièces techniques pour l'aéronautique par exemple, une certaine possibilité d'automatisation partielle. En revanche, le procédé est lent, les séries sont limitées, en général inférieures à mille pièces par an, la main-d'œuvre qualifiée est importante, la face qui n'était pas en contact avec le moule est brute et plus ou moins régulière, en général inesthétique.

7.2.2 Principe du moulage au contact par projection simultanée

Il s'agit d'une variante du moulage au contact dans laquelle le dépôt des renforts constitués uniquement de fibres coupées et de la résine est fait par projection simultanée au pistolet. Pour conserver des propriétés mécaniques élevées, il faut également intercaler manuellement des tissus. Comme précédemment, la réticulation a d'abord lieu à température ambiante dans le moule jusqu'à obtention de propriétés mécaniques suffisantes pour permettre le démoulage. Le durcissement est ensuite poursuivi hors du moule, sans contrainte, à température ambiante ou éventuellement à une température modérée, par exemple 70 °C, pour accélérer la réticulation.

La stratification sur noyau à la place du moule est également réalisable.

L'intérêt spécifique réside dans la simplification du dépôt simultané du renfort et de la résine, qui facilite la mise en œuvre, dans l'amélioration de la productivité par rapport au moulage au contact simple et dans les meilleures possibilités d'automatisation. Les autres avantages du moulage au contact sont conservés tels que le faible coût des moules et outillages, la grande liberté de formes et d'épaisseurs importantes, les possibilités de mouler les très grandes pièces, l'aptitude à la réalisation de prototypes et de pièces en petite série, même techniques (aéronautique).

Les inconvénients proviennent des pertes de résine par pistolement, de la difficulté à obtenir des épaisseurs régulières, de la faiblesse des cadences malgré les progrès par rapport au moulage au contact simple, de la limitation des séries, en général inférieures à mille pièces par an, de la main-d'œuvre spécialisée importante, de l'aspect en général inesthétique de la face extérieure brute et plus ou moins régulière.

7.2.3 Moulage au contact sous presse

Ce procédé combine le moulage au contact et la réticulation sous presse.

On réalise, dans une première étape, une stratification au contact ou par projection sur un moule d'une part, et sur un contre-moule d'autre part, puis on colle les deux demi-moulages en fermant le moule et le contre-moule dans une presse à compression (figure 7.3).

Les avantages du procédé résident dans l'obtention d'un bel aspect sur toute la surface de la pièce si l'on a pris la précaution de déposer un *gelcoat* sur chaque demi-moule, dans la meilleure cohésion de la matière et la réduction des bulles, cloques et autres vides grâce à la compression, dans la grande

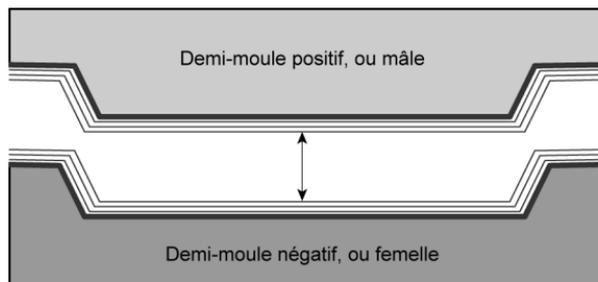


Figure 7.3 – Principe du moulage au contact sous presse.

liberté de formes et d'épaisseurs puisqu'il suffit de déposer le nombre suffisant de couches de renforts et de résine, dans l'apertüre à la réalisation de prototypes et de pièces en petite série, même techniques.

Les inconvénients du procédé découlent des investissements plus importants pour la presse, du coût supplémentaire du moule, de la faible productivité et du renchérissement dus aux deux moulages au lieu d'un et du passage sous presse, de la main-d'œuvre qualifiée importante, de la grandeur des pièces limitée par les dimensions de la presse, des risques de problèmes d'adhérence des deux parties moulées séparément, des risques de déplacement des renforts, de la faiblesse des cadences et des séries.

7.2.4 Moulage au sac sous vide ou sous pression

Au lieu d'utiliser une presse pour réaliser la compression, on enferme la pièce dans un sac ou, plus souvent, entre le moule et un film ou une feuille, convenablement disposés pour réaliser l'étanchéité au vide partiel ou à une pression limitée.

Sur le stratifié réalisé sur son moule, au contact ou par projection, on applique une feuille souple autodémoulante puis on crée un vide léger ou une faible pression par un système convenable (figure 7.4). La feuille autodémoulante se trouve appliquée par la force du vide ou de la pression partielle sur la face libre du stratifié, qui prend un aspect beaucoup plus esthétique que dans le procédé au contact simple.

Les avantages du procédé résident dans l'obtention d'un meilleur aspect sur toute la surface de la pièce au contact du film ou du sac, dans le meilleur débullage si l'on utilise le vide, dans la grande liberté de formes et d'épaisseurs puisqu'il suffit

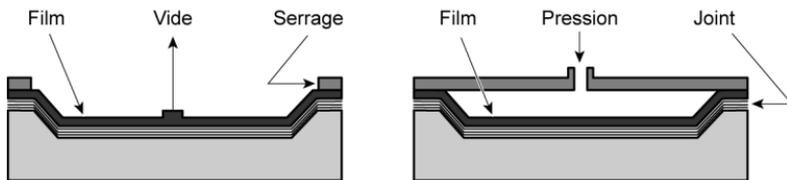


Figure 7.4 – Principe du moulage au contact et réticulation au sac.

de déposer le nombre suffisant de couches de renforts et de résine, dans l'aptitude à la réalisation de prototypes et de pièces en petite série, même techniques.

Les inconvénients du procédé découlent de la plus grande complexité du procédé, du coût supplémentaire du dispositif de mise sous vide ou en pression, de la faible productivité, de la main-d'œuvre qualifiée importante, de la limitation de la grandeur des pièces due aux dimensions du moule, de la faiblesse des cadences et des séries.

7.3 Méthodes par écoulement de résines liquides : coulée, RTM, RIM, infusion

7.3.1 Coulée de résine chargée de fibres

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

Les avantages du procédé résident dans sa simplicité, dans les faibles investissements, dans l'obtention d'un aspect correct sur toute la surface de la pièce si le moule est bien réalisé, dans l'aptitude à la réalisation de prototypes et de pièces en petite série.

Les inconvénients du procédé découlent de la limitation du renforcement due au faible taux et à la longueur des fibres tolérés par la résine, de la

main-d'œuvre importante, de la limitation de la grandeur des pièces due aux dimensions du moule, de la faiblesse des cadences et des séries.

7.3.2 Moulage par injection-réaction de résine renforcée : RRIM et SRIM ou SRRIM

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

SRRIM ou SRIM : Structural Reinforced Resin Injection Moulding. Un renfort structurel est placé dans le moule avant injection de la résine.

Le principe le plus évolué, SRRIM, est décrit par la figure 7.5 :

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

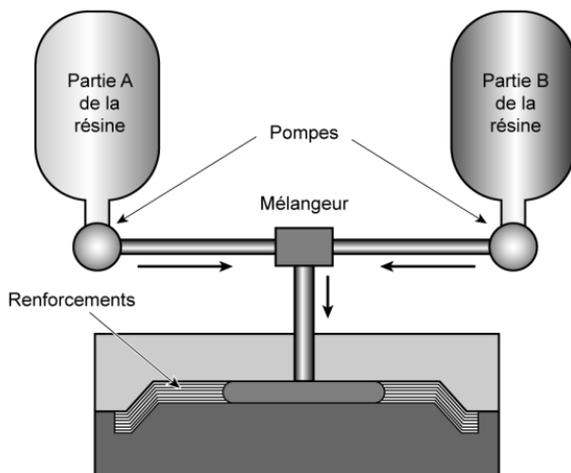


Figure 7.5 – Principe du SRRIM.

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

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

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

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

7.3.3 Infusion, imprégnation sous vide : SCRIMP, RIFT, VARTM, RFI

SCRIMP : Seeman's Composite Resin Infusion Moulding Process.

VARTM : Vacuum Assisted RTM.

RFI : Resin Film Impregnation.

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

Pour l'infusion de résine liquide (figure 7.6), le renfort structurel ayant été déposé manuellement dans le moule, un film anti-adhérent imperméable ou une feuille souple sont appliqués sur le moule pour le fermer, puis la résine est introduite en faisant le vide dans l'empreinte. Après un temps de durcissement convenable, la pièce peut être démoulée. Éventuellement, une élévation de la température permet d'accélérer le processus de durcissement.

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

Les avantages du procédé résident dans l'automatisation du mélangeage et de l'alimentation du moule, dans la possibilité d'utiliser tous types de renforts et

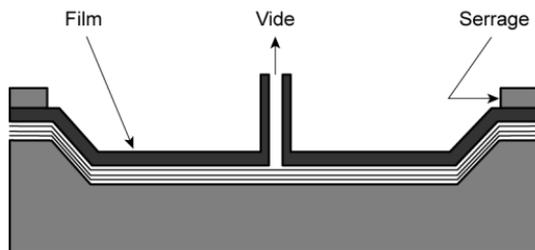


Figure 7.6 – Principe de l'infusion.

de les disposer à volonté dans le moule avant injection, dans le remplacement de la partie supérieure du moule par un film beaucoup moins onéreux, dans les coûts de transformation modérés, dans l'obtention d'un aspect correct sur toute la surface de la pièce, dans l'aptitude à la réalisation de grandes pièces, dans la possibilité d'accélérer le durcissement par chauffage. Les avantages sont particulièrement intéressants par rapport au moulage au contact par stratification manuelle ou par pulvérisation à cause des cycles plus rapides et de l'amélioration des conditions d'hygiène et de sécurité.

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

7.4 Drapage

Le procédé (figure 7.7) consiste à déposer des rubans, tissus, *rovings*, etc. préimprégnés de résine thermoplastique ou thermodurcissable, éventuellement découpés à la forme voulue, sur un moule en assurant la consolidation par chauffage et application d'une pression. Les pièces fabriquées à partir de préimprégnés thermodurcissables sont ensuite réticulées par cuisson en autoclave, au sac sous vide ou sous pression ou, plus rarement, par faisceau d'électrons.

La préimprégnation peut être réalisée en ligne ou l'on peut utiliser des préimprégnés secs réactivés par la chaleur.

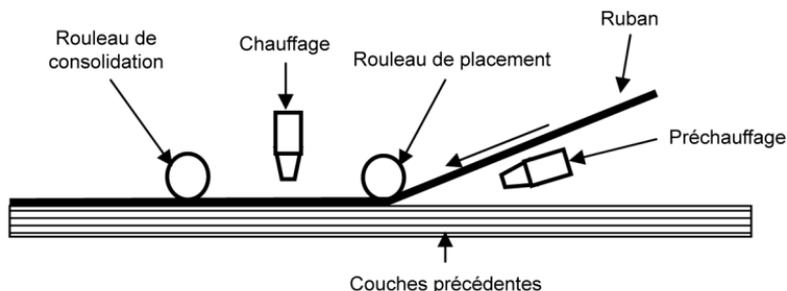


Figure 7.7 – Principe du drapage.

Le placement des préimprégnés peut être manuel ou plus ou moins automatisé, faisant appel à des machines dont les plus sophistiquées sont entièrement commandées par ordinateur pour les pièces aéronautiques par exemple.

Le placement manuel autorise l'emploi de toutes les sortes de renforts, y compris les nids-d'abeilles et les mousses découpés aux formes voulues, alors que le placement automatique est plus adapté aux renforts continus.

Le drapage est surtout utilisé pour les pièces techniques, particulièrement pour l'aéronautique, le spatial, la détection électronique...

Les avantages et inconvénients du procédé dépendent de la technique utilisée. La dépose manuelle exige peu d'investissements et permet une grande liberté de conception avec des fortes variations d'épaisseur, des renforts très localisés et des formes complexes. En revanche, la main-d'œuvre doit être bien formée et les risques d'erreurs de placement sont plus élevés. La dépose automatisée exige des investissements d'autant plus lourds que l'automatisation est poussée et offre moins de souplesse de conception mais la fabrication est plus rapide et la répétabilité est meilleure.

7.5 Stratification continue de plaques ou feuilles ondulées ou nervurées

Dans ce processus continu schématisé sur la figure 7.8 :

- la résine thermodurcissable renforcée de fibres de verre coupées est déposée en continu sur un film support qui tient lieu de moule ;
- un deuxième film déposé sur la résine tient lieu de partie supérieure de moule ;

- une première batterie de rouleaux régularise l'épaisseur de la feuille formée ;
- éventuellement, une deuxième batterie de rouleaux met la feuille en forme, ondulations ou nervures longitudinales ;
- le durcissement est effectué dans un four-tunnel avant enroulage, pour les produits souples, ou avant découpe à longueur, pour les plaques rigides.

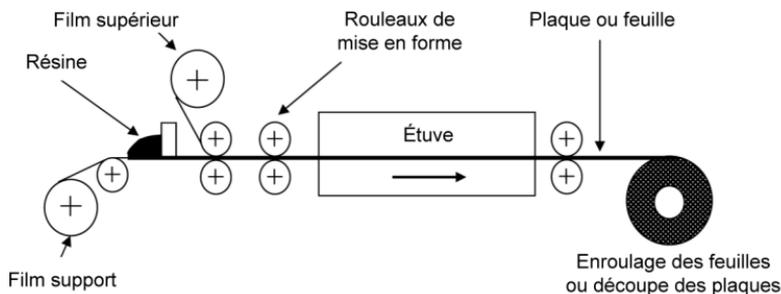


Figure 7.8 – Principe de la stratification continue de feuilles et plaques.

Comme pour la majorité des composites, le dépôt d'un *gelcoat* peut être nécessaire.

Les avantages du procédé découlent de sa continuité, qui entraîne de faibles coûts de main-d'œuvre. En revanche, les investissements sont notables, la fabrication est exclusivement réservée aux feuilles et plaques, et les possibilités de mise en forme sont limitées.

7.6 Moulage par centrifugation

Le renfort, généralement du *roving* coupé en ligne, et la résine sont projetés à l'intérieur d'un moule en rotation pour plaquer la résine renforcée contre ses parois grâce à la force centrifuge.

Par son principe même, ce procédé discontinu ne peut être utilisé que pour des pièces telles que tubes, tuyaux, cuves...

Du fait de la force centrifuge :

- la face extérieure lisse est, en général, riche en renfort du fait de sa densité plus élevée que celle de la résine ;
- la face interne est plus riche en résine, ce qui améliore son imperméabilité et sa résistance à la corrosion chimique.

Le procédé, discontinu et relativement lent, est utilisé principalement pour des tubes, tuyaux, cuves.

7.7 Enroulement filamentaire

Les fibres continues de renforcement, imprégnées de résine, sont enroulées sur un mandrin qui tourne sur son axe comme schématisé sur la figure 7.9. Les fibres peuvent être déposées perpendiculairement à l'axe du mandrin (enroulement circonférentiel) ou inclinées suivant n'importe quel angle par rapport à cet axe (enroulement hélicoïdal) ou encore pratiquement parallèles à l'axe.

La préimprégnation peut être réalisée en ligne ou l'on peut utiliser des préimprégnés secs réactivés par la chaleur.

Le mandrin peut être destructible, récupérable ou non et, dans ce dernier cas, il fait alors partie de la pièce finie, solution fréquente pour les réservoirs, le mandrin servant de revêtement interne.

Pour les résines thermodurcissables, le durcissement est obtenu par chauffage en étuve ou en autoclave.

Pour les composites à matrice thermoplastique, la consolidation s'obtient naturellement par refroidissement à la température ambiante.

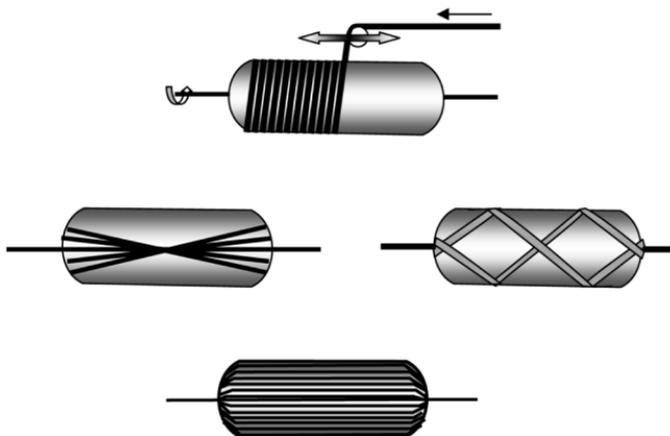


Figure 7.9 – Principe de l'enroulement filamentaire.

Les dimensions des matériels peuvent être très importantes, allant jusqu'à la construction de machines spéciales sur site pour réaliser, en place, des réservoirs ou silos géants, supprimant ainsi les problèmes de transport.

Bien que généralement connu et utilisé pour des pièces telles que cuves et réservoirs, il faut rappeler que l'enroulement filamentaire est également utilisé pour des pièces techniques à hautes performances telles que des bielles de transmission d'efforts qui équipent certains avions. Réalisées en fibres de carbone et résine époxy, l'enroulement des fibres se fait sur un mandrin en sable durci, détruit ultérieurement.

Les avantages du procédé concernent : les taux élevés de renfort, qui peuvent atteindre 60 à 75 %, voire 80 %, permettant l'obtention d'excellentes caractéristiques mécaniques ; la possibilité de privilégier les renforcements dans des directions choisies en modifiant l'angle d'enroulement ; l'importance des dimensions de pièces ; l'application aux thermodurcissables et thermoplastiques renforcés fibres continues.

En revanche, les investissements sont importants, les possibilités de formes de pièces sont limitées, la nature et la disposition des renforts doivent être soigneusement calculées.

Les applications, dans les limites déjà citées, sont variées, par exemple pour les utilisations classiques : réservoirs sous haute pression avec liner interne métallique, cuves, silos, wagons-citernes, cuves à produits chimiques ou à vin en polyester/fibres de verre jusqu'à 10 m de diamètre ; tuyaux, tubes, tuyauteries en polyester/fibres de verre jusqu'à 10 m de diamètre. Les applications plus techniques concernent, entre autres, les arbres de transmission pour l'automobile, les pales d'hélicoptères ou de turbines, les bielles de transmission d'efforts pour l'aéronautique, etc.

7.8 Pultrusion

7.8.1 Pultrusion conventionnelle des thermodurcissables

Les renforts (des *rovings* dans le schéma de la figure 7.10), convenablement imprégnés de résines, passent en continu dans une filière et un four de cuisson chauffés entre 120 et 150 °C. Un train de tirage assure l'entraînement du profilé.

Des systèmes annexes permettent, éventuellement, de courber le profilé avant durcissement mais la forme de la section, étant donnée par la filière, est identique dans toute la longueur.

Ce procédé est adapté à la réalisation de profilés complexes, creux ou pleins, à hautes caractéristiques mécaniques grâce aux forts taux de renforts unidirectionnels.

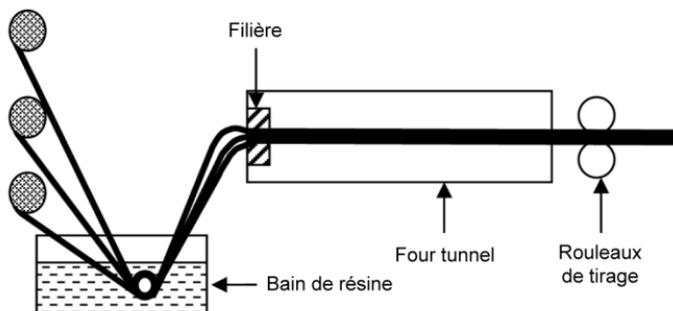


Figure 7.10 – Principe de la pultrusion conventionnelle.

Les avantages du procédé sont de plusieurs ordres :

- système de production continue entraînant de faibles coûts de main-d'œuvre ;
- longueur des profilés pratiquement illimitée ;
- excellentes propriétés mécaniques dans le sens de la longueur des profilés ;
- surfaces lisses sauf pour les extrémités brutes de coupe.

En revanche, les inconvénients du procédé découlent de sa spécificité :

- fabrication exclusivement de profilés ;
- dimensions limitées en section ;
- choix limité des renforts ;
- renforcement uniquement unidirectionnel ;
- investissements importants.

Exemples d'applications : tous profilés rectilignes ou courbes.

7.8.2 Pultrusion de préimprégnés thermoplastiques et de résines thermoplastiques

La pultrusion a été adaptée aux préimprégnés thermoplastiques réactivés par chauffage jusqu'à 200 °C ou plus par infrarouges ou par air chaud avant d'être recouverts d'un thermoplastique dans une extrudeuse à tête d'équerre comme schématisé par la figure 7.11.

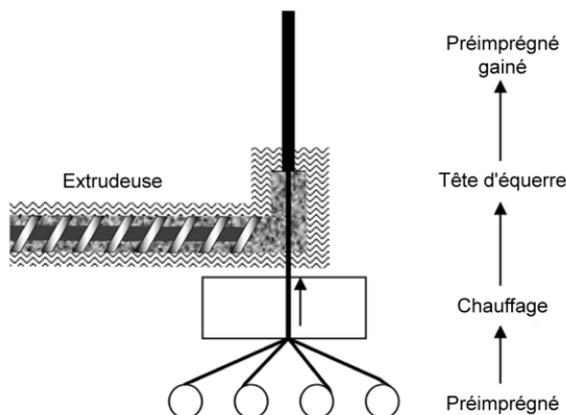


Figure 7.11 – Principe de la pultrusion adaptée aux préimprégnés thermoplastiques.

7.8.3 Pultrusion de préimprégnés thermodurcissables et extrusion ou surmoulage de résines thermoplastiques

Des profilés pultrudés à matrice thermodurcissable sont recouverts, en ligne, d'une gaine de thermoplastique par extrusion dans une extrudeuse à tête d'équerre (voir figure 7.11) ou par surmoulage, en ligne ou en reprise, par un thermoplastique ou un TPE.

Le but est à la fois de protéger le profilé et de lui donner des propriétés de surface spécifiques, par exemple un toucher agréable de TPE, propriétés amortissantes, protection chimique, etc.

7.9 Pullwinding, overbraiding

Ce procédé, schématisé sur la figure 7.12, utilise conjointement l'enroulement filamentaire continu, qui permet de disposer un ou plusieurs renforts en hélice autour d'un mandrin, et la pultrusion, qui permet l'imprégnation avec une résine.

Les avantages du procédé combinent ceux de l'enroulement filamentaire et de la pultrusion :

- système de production continue entraînant de faibles coûts de main-d'œuvre ;
- longueur des tuyaux et profilés pratiquement illimitée ;

- excellentes propriétés mécaniques dans le sens de la longueur des profilés et dans le sens transversal grâce à l'enroulement des renforts ;
- surfaces lisses sauf pour les extrémités brutes de coupe ;
- possibilité d'utiliser des préimprégnés thermoplastiques renforcés de fibres continues.

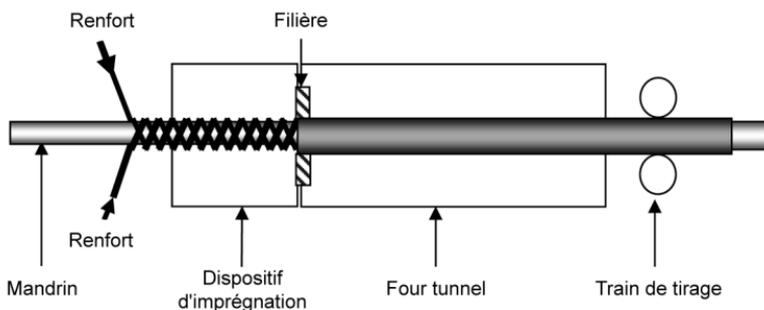


Figure 7.12 – Principe du pullwinding.

En revanche, les inconvénients du procédé découlent de sa spécificité :

- fabrication exclusivement de tubes, tuyaux et profilés ;
- dimensions limitées en section ;
- choix réduit des formes et renforts ;
- investissements importants.

Exemples d'applications pour l'aéronautique et l'espace : pales d'hélice, cône de nez de missile. La technique est également utilisée pour des articles de sport et loisirs tels que mats, skis, crosses de hockey, clubs de golf, pagaies.

7.10 Construction sandwich, panneaux sandwichs

La construction sandwich consiste à assembler solidement un noyau et des composites de surface ou peaux comme schématisé sur la figure 7.13 avec, sur la vue de gauche, un panneau plat classique et, sur la vue de droite, la coupe d'une pièce à section elliptique composée d'un noyau et d'une peau formant enveloppe.

Les pièces les plus simples, panneaux sandwichs plats, comprennent deux feuilles, souvent appelées « peaux » ou « parements », en composites à base de matrices therm durcissables ou thermoplastiques renforcées (mats, tissus, fibres, préimprégnés, TRE...) recouvrant une âme de matériau léger tel que nid-d'abeilles, alvéolaire, bois ou contre-plaqué.

Le tout, à condition que l'assemblage soit solide et isotrope, forme un ensemble qui se comporte comme une poutre en I avec un excellent rapport rigidité/poids, d'autant que le matériau d'âme est plus léger. Les âmes en mousse ont également l'avantage de procurer une bonne isolation thermique mise à profit dans les panneaux pour le BTP et la construction de carrosseries frigorifiques ou de chambres froides.

Les deux peaux peuvent être de natures différentes de façon à assurer des fonctions spécifiques de chaque côté du panneau, par exemple une peau composite extérieure et une peau en tôle inoxydable intérieure pour des caisses frigorifiques ou le contraire pour des aménagements de wagons de voyageurs.

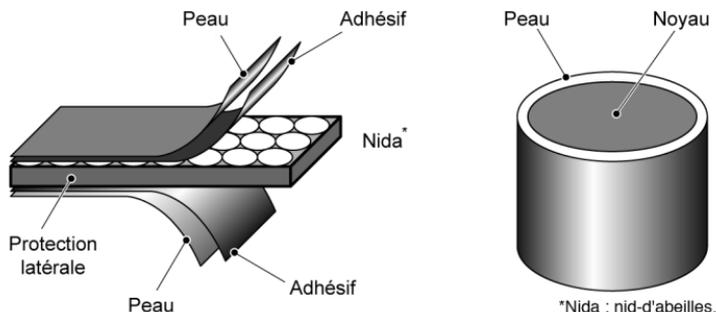


Figure 7.13 – Principe de la construction sandwich.

Plusieurs méthodes de fabrication sont utilisées :

- préfabrication des deux peaux et collage sur les deux faces de l'âme ;
- application d'une peau en TRE sur chaque face de l'âme ;
- stratification directe des peaux sur l'âme ;
- coulée de mousse entre les deux peaux préfabriquées ;
- pose d'un insert de compound gonflant à l'intérieur d'un profilé ou d'une pièce en composite rigide. L'insert gonfle ensuite sous l'effet d'un dégagement de chaleur déclenché spécifiquement ou résultant d'une opération telle que cuisson de peinture.

Avantages et inconvénients des constructions sandwichs : les mousses et nids-d'abeilles conduisent à d'excellents rapports propriétés/poids alors que les contre-plaqués offrent de très bons rapports propriétés/prix ; les nids-d'abeilles et le bois se prêtent mal à la réalisation de formes complexes et les nids-d'abeilles et mousses peuvent présenter des résistances en compression plus faibles.

Les utilisations sont très diversifiées suivant la nature des âmes et des peaux, par exemple :

- âme mousse et peaux en polyester renforcé fibres de verre : éléments de carrosseries de véhicules isothermes ou réfrigérés, construction navale, panneaux de protection de têtes de puits de pétrole sous-marins, panneaux sandwichs structurels pour logement en urgence, maisons modulaires, bureaux de chantiers, portes de garages, planchers de balcons prêts à poser pour construction d'immeuble, chambres froides, poutres de renfort pour réhabilitation de pont métallique, portes et planchers pour cabines de funiculaires, pales de ventilateurs, isolations thermiques et phoniques pour le bâtiment ;
- âme mousse et peaux en résine phénolique renforcée fibres de verre : portes et panneaux coupe-feu ;
- âme mousse et peaux en époxy renforcé fibres de verre, de carbone ou d'aramide ou mixtes : panneaux résistant au feu, faces avant et arrière de réflecteurs pour antennes paraboliques de 3 à 4 m de diamètre, roues 3 rayons et cadres pour vélos de sport, coques de bateaux de compétition ;
- âme mousse et peaux en TRE : sièges et tablettes arrière pour l'automobile, écrans insonorisants pour automobile, coques de valises, portes isolantes pour double porte de maison ;
- âme contreplaqué : construction marine, conteneurs, planchers de caisses de camions isothermes ;
- âme nid-d'abeilles : éléments de structure dans l'aéronautique et le spatial, planchers d'avions civils, empennages, pales d'hélicoptères, panneaux pour extérieur d'immeuble, cloisons intérieures de bâtiment, mobilier contemporain, carcasses de capteurs solaires, monocoques de compétition de 25 m, antennes paraboliques de 15 m de diamètre, carénage aéronautique, polariseurs sur avions de chasse, bennes et bras porteurs de téléphériques.

La figure 7.14 schématise l'une des méthodes de fabrication continue, le préimprégné pouvant être remplacé par toute autre forme de feuille composite y compris du TRE. Si l'adhésion naturelle n'est pas suffisante, il est nécessaire d'utiliser un adhésif.

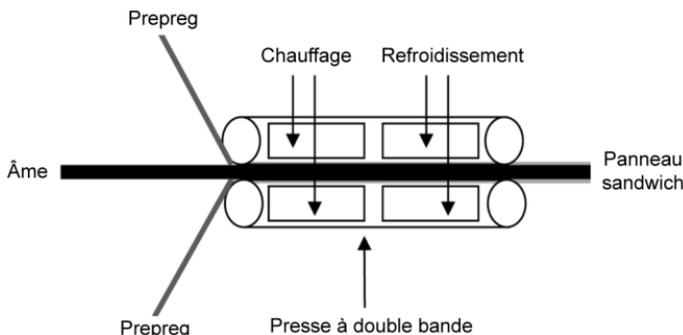


Figure 7.14 – Principe de fabrication de panneau sandwich à peaux en prepreg.

Une variante du procédé illustré par la figure 7.14 utilise des presses compression à plateaux multiples au lieu de la presse à double bande mais la fabrication devient discontinue.

7.11 Les préimprégnés thermoplastiques en feuilles ou thermoplastiques renforcés estampables

Les thermoplastiques renforcés estampables (TRE), ou GMT (Glass Mat Thermoplastics), sont des plaques de résine thermoplastique compacte renforcée de mat de fibres, souvent de verre, et, éventuellement, de fibres continues unidirectionnelles. L'imprégnation peut se faire par voie sèche ou par voie humide conduisant à certaines propriétés d'usage significativement différentes, mais les pièces en TRE ont de toute façon de bonnes propriétés mécaniques.

Les TRE peuvent être mis en forme de plusieurs façons différentes :

- par estampage (figure 7.15) après réchauffage des flans découpés dans les plaques de TRE. Le fluage/formage est tout à fait analogue à l'emboutissage des tôles métalliques : les flans prédécoupés et réchauffés à leur point de ramollissement sont transférés dans l'outillage d'une presse à estamper. Les pressions sont de l'ordre de 150 à 200 kg/cm² avec des temps de cycle de 20 à 50 s. Les formes peuvent être complexes et l'aspect de surface est meilleur. Le fluage est très important. Les épaisseurs minimales sont de 1 mm ;

- par moulage sous presse compression effectué sous des pressions beaucoup plus faibles, de 5 à 30 kg/cm², et à des températures moins élevées. Les dimensions des flans sont du même ordre que celles des pièces finies et le fluage est moins important. Les formes doivent être relativement simples et l'aspect de surface peut être moins bon. En revanche, le procédé permet l'habillage par un tissu d'aspect ;
- par thermoformage sous vide suivant les techniques habituelles ;

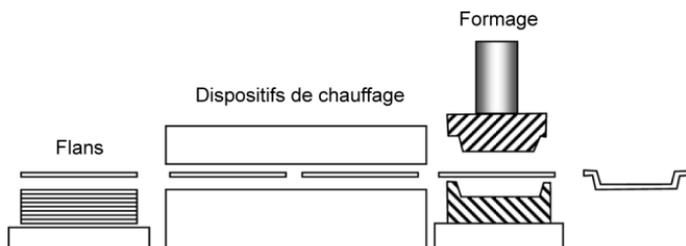


Figure 7.15 – Principe de la fabrication par estampage de TRE.

- par moulage sur membrane élastomère, procédé utilisé par l'industrie aéronautique suivant le schéma de la figure 7.16 avec un demi-moule inférieur métallique conventionnel et une membrane élastomère faisant office de demi-moule supérieur.

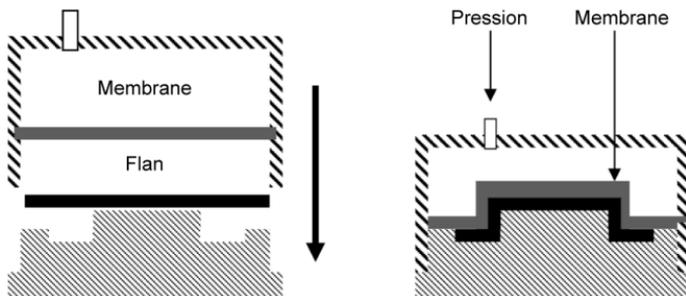


Figure 7.16 – Principe de la fabrication par moulage à la membrane.

Suivant le procédé utilisé, les cadences peuvent être élevées, avoisinant celles obtenues avec les métaux, avec la possibilité de produire des grandes pièces. Les inconvénients résultent du choix limité de TRE et de la tendance au fluage des matrices thermoplastiques.

Les exemples d'utilisations sont variés tels que :

- automobile : pare-chocs, tabliers, traverses, inserts pour tableaux de bord, écrans phoniques, carcasses de sièges ;
- stockage, manutention : conteneurs, réservoirs ;
- divers : casques de soudure, carcasses de ventilateurs, platines-supports de tondeuses à gazon...

Les TRE sont en concurrence avec les métaux, les SMC/BMC et les pièces injectées. Par rapport aux premiers, ils apportent un gain de poids, une bonne isolation thermique, électrique et phonique et l'absence de rouille. Par rapport aux SMC/BMC, la densité est plus faible, la résistance au choc à froid peut être supérieure, le cycle de fabrication est plus court et, surtout, le stockage est illimité, ce qui n'est pas le cas des SMC. Par rapport aux pièces injectées renforcées, la résistance au choc et la rigidité sont souvent plus élevées car les fibres sont plus longues. Les coûts d'investissements et d'outillages demeurent aussi plus modestes.

En revanche, les TRE peuvent présenter des problèmes de finition.

8 • MATÉRIAUX ALVÉOLAIRES : MOUSSES, EXPANSÉS, ALLÉGÉS

Les matériaux alvéolaires sont constitués d'un squelette de polymère entourant des alvéoles, fermés ou, partiellement ou totalement, ouverts sur les alvéoles voisins ou sur l'extérieur. Cette définition recouvre des produits très divers, par exemple :

- polymères cellulaires, dans lesquels la majorité des alvéoles sont des cellules (alvéoles fermés) ;
- polymères poreux, ou spongieux, dans lesquels la majorité des alvéoles sont des pores qui communiquent entre eux, à travers toute la masse, ainsi qu'avec l'extérieur ;
- mousses, dont les alvéoles, ouverts ou fermés, sont produits par l'expansion, chimique ou physique, d'un gaz. La mousse peut être commercialisée en l'état avec sa peau de fabrication ou après usinage, sans peau ;
- mousses à peau intégrale, dont la peau non alvéolaire a été intégralement conservée ;
- mousses structurelles, ou structurales, encore appelées « allégés structuraux », dont les propriétés mécaniques sont suffisantes pour leur permettre d'assurer durablement la solidité de la pièce ou de participer à la résistance de l'ensemble dans lequel elles sont intégrées ;
- mousses syntactiques, obtenues par incorporation de microsphères creuses et, éventuellement, de macrosphères creuses dans une matrice de polymère compact.

Font également partie des matériaux alvéolaires mais ne sont pas traités dans ce chapitre : les nids-d'abeilles et leurs dérivés, les plaques compartimentées ou à caissons, les panneaux sandwichs ou panneaux composites déjà traités au chapitre 7.

Outre ces caractéristiques morphologiques, les matériaux alvéolaires diffèrent par la nature du polymère (presque toutes les familles sont utilisables) et par les dimensions et taux d'alvéoles, qui conditionnent la densité apparente.

Plusieurs types de méthodes conduisent à la fabrication des polymères alvéolaires :

- vaporisation d'un liquide préalablement absorbé par le polymère, sous l'action de la chaleur : pentane absorbé par le polystyrène expansible ;
- désorption partielle et dilatation d'azote ou autre gaz préalablement absorbé sous haute pression qui se dilate lorsque le polymère revient à la pression atmosphérique : cas de la mousse de polystyrène extrudée ;
- décomposition d'agents gonflants sous l'action de la chaleur produisant de l'azote ou du gaz carbonique : procédé très utilisé pour les mousses d'élastomères ;
- injection directe d'un gaz sous haute pression dans le polymère fondu en cours d'extrusion ;
- introduction physico-mécanique d'air ou d'azote dans le polymère sous forme de dispersion : moussage des latex additionnés d'agents tensioactifs par battage avec de l'air ;
- réaction chimique au sein du polymère dégageant un gaz : gaz carbonique produit par la réaction de l'eau sur l'isocyanate du polyuréthane ;
- dissolution de produits dispersés plus ou moins grossièrement dans le polymère : par exemple gros sel dissous ensuite par immersion prolongée dans l'eau ;
- mélangeage avec des billes creuses : mousses syntactiques.

8.1 Moulage des polystyrènes et polypropylènes expansibles : PSE ou EPS et EPP

Les perles de polystyrène rendu expansible par incorporation d'un agent d'expansion facilement volatil, par exemple pentane ou autre, sont soumises à plusieurs traitements :

- pré-expansion : vaporisation dans un pré-expandeur de l'agent d'expansion par action de la vapeur d'eau à 100-105 °C, ce qui entraîne la formation de cellules remplies des vapeurs de l'agent d'expansion qui ne diffuse que lentement. Plusieurs types de pré-expandeurs se partagent le marché, de

- type continu ou discontinu. Certains modèles utilisent la chaleur sèche à la place de la vapeur et le vide pour faciliter l'expansion ;
- séchage de l'eau superficielle résultant de la condensation de vapeur par passage dans un lit fluidisé ou par utilisation d'un système de transport à air chaud ;
 - mûrissement, ou maturation, ou stockage intermédiaire pendant 10 à 12 h. Le refroidissement du polymère entraîne la condensation de l'agent gonflant à l'intérieur des alvéoles, ce qui tend à mettre les cellules en dépression. Pour rétablir l'équilibre des pressions, les cellules absorbent de l'air ambiant ;
 - séchage pour éliminer l'excès de pentane ;
 - moulage : les billes pré-expansées sont versées dans les empreintes des moules avant d'y admettre de la vapeur à 115-125 °C pour créer une pression par dilatation de l'air emprisonné dans les cellules. Cette pression et l'élévation de la température vont permettre la cohésion des billes pour former le bloc ou la pièce définitive.

L'agent d'expansion, un hydrocarbure (pentane par exemple), est facilement inflammable et des précautions contre l'incendie doivent être prises à tous les stades de transport, manutention, stockage, fabrication...

8.2 Moussage des polyuréthanes

Les mousses de polyuréthane se différencient par :

- la composition et le mode de moussage : pourcentages et natures des polyols, isocyanates, moussage par voie chimique (par exemple l'action de l'eau sur les isocyanates qui libère du gaz carbonique) ou moussage par voie physique à l'aide d'agents gonflants tels que HFC, HFA, pentane... à faibles points d'ébullition. Le choix des agents gonflants doit respecter les normes environnementales et sécuritaires en continuelle évolution et variables en fonction des régions ;
- le matériel de dosage et mélangeage : machines basse et haute pressions. Les machines de dosage-mélangeage basse pression sont alimentées par des pompes à engrenages, le mélangeage s'effectuant par agitateur ou air comprimé. Ce type est bien adapté aux débits modérés de quelques kilogrammes à quelques dizaines de kilogrammes par minute. Les machines de dosage-mélangeage haute pression sont alimentées par des pompes à piston fonctionnant à contre-courant et fournissant des débits nettement plus importants de quelques centaines de kilogrammes par minute ;

- les techniques de mise en œuvre :
 - moussage libre continu en blocs ou en plaques. La machine de dosage-mélangeage animée d'un mouvement de va-et-vient débite régulièrement le polyuréthane sur toute la largeur d'une bande sans fin recouverte d'un papier siliconé. L'expansion se fait naturellement et les blocs de mousse sont débités en sortie de tapis,
 - moussage forcé en moule sous pression de quelques bars,
 - moussage *in situ* utilisant le même principe que précédemment, le moule étant remplacé par une cavité à remplir dont les parois doivent résister aux températures et pressions générées par le moussage,
 - injection-réaction RIM et RRIM, dont le principe a été examiné au chapitre 7,
 - projection au pistolet.

8.3 Alvéolaires et allégés par voie chimique à l'aide d'agents gonflants

Les agents gonflants permettent l'obtention, sur du matériel de transformation standard, de mousses ou d'allégés à partir de pratiquement toutes les familles de matières plastiques.

Le principe consiste à incorporer un agent gonflant ou spumogène tel que l'azodicarbonamide ou le bicarbonate de sodium à la résine à transformer. L'agent gonflant se décompose sous l'action de la chaleur en libérant des volumes importants de gaz qui ne peut ni se dissoudre dans le plastique ni s'échapper par perméabilité, produisant l'expansion dès le retour à la pression atmosphérique en sortie de filière, avant le refroidissement qui va fixer l'état physique du thermoplastique ou avant la réticulation qui va rendre le thermdurcissable solide.

Le procédé qui utilise des extrudeuses standards est théoriquement simple mais présente cependant quelques difficultés concernant les profils de température et les paramètres d'extrusion qui doivent être optimisés pour assurer un bon équilibre entre la décomposition de l'agent gonflant, la mise en forme du profilé et l'expansion après la sortie de la filière. L'agent gonflant doit être adapté à la rhéologie de la résine et aux températures de mise en œuvre pour se décomposer convenablement. Enfin, les matériaux alvéolaires sont de meilleurs isolants thermiques que les mêmes matériaux compacts, ce qui rend le refroidissement plus difficile. Le procédé s'applique à l'extrusion en continu

de plaques, tubes et profilés avec des densités généralement dans une fourchette de 0,3 à 0,6 g/cm³.

Le même procédé s'applique au moulage avec des adaptations des conditions opératoires suivant le taux d'expansion désiré.

Citons enfin l'expansion en place de préformes de polyéthylène expansible utilisées dans l'industrie automobile pour combler et étancher des espaces libres entre pièces différentes (procédé Ymos sous licence Exxon).

8.4 Moussage par voie physique à l'aide de gaz occlus

L'utilisation de gaz pour produire des alvéolaires a donné naissance à trois types principaux de méthodes. Depuis longtemps, la saturation préalable des polymères avec un gaz et l'introduction d'air par des moyens mécanique sont utilisés pour produire des alvéolaires. Plus récemment, l'injection directe de gaz sous haute pression pendant la mise en forme s'est développée.

8.4.1 Absorption préalable sous haute pression

Le polymère complètement formulé est mis en contact avec de l'azote sous haute pression dans des chambres spécialement conçues. Après le temps nécessaire pour obtenir la saturation de la résine malgré sa faible perméabilité, la pression d'azote est relâchée, provoquant l'expansion du gaz occlus qui est insoluble à pression atmosphérique et ne peut pas désorber par suite de l'imperméabilité des résines. Ce procédé discontinu conduit à de bonnes propriétés mais nécessite du matériel très spécifique et ne convient qu'à des formes simples.

8.4.2 Injection directe dans le polymère fondu en cours de transformation

L'injection directe de gaz demande une combinaison de moyens matériels, grades spéciaux de polymères et adaptation de procédures. À titre d'exemple, les procédés MuCell® et Optifoam™ de moulage ou d'extrusion par injection de gaz supercritique impliquent les promoteurs de leur développement industriel, Trexel ou Sulzer Chemtech, des constructeurs de machines et des producteurs de matières plastiques.

Le procédé MuCell® consiste à expandre la pièce par une injection contrôlée de gaz à une pression supérieure à celle de sa tension de vapeur (état supercritique) dans le polymère fondu. Schématiquement, quatre étapes doivent être franchies :

- de l'azote ou du gaz carbonique dans un état supercritique (SCF – Super-Critic Fluid) est injecté directement dans le fourreau de la presse d'injection ou de l'extrudeuse. Le dispositif de préparation du SCF, la vis et les injecteurs de SCF doivent être spécialement conçus pour faciliter la formation d'un système monophasé ;
- la nucléation, initiée par une chute rapide de la pression, conduit à la formation homogène d'un grand nombre de sites ;
- l'expansion des cellules est contrôlée par action sur les profils de température et de pression pour obtenir des cellules de l'ordre de 5 à 50 µm et des réductions de densité de l'ordre de 10 à 95 % ;
- les outillages de mise en forme optimisés permettent l'obtention de la forme définitive.

Le procédé MuCell® est destiné à l'injection de pièces techniques ou de précision en thermoplastique.

Les avantages qualitatifs du procédé s'accompagnent de certains avantages économiques comme la possibilité de produire de 20 à 30 % de pièces en plus sur la même machine, ainsi que celle de mouler des pièces sur une presse de moindre tonnage grâce à l'abaissement de la viscosité et à l'élimination des dispositions d'étanchéité liées à l'utilisation de gaz en phase supercritique. Les densités peuvent descendre jusqu'à des niveaux de l'ordre de 0,03 g/cm³. Les inconvénients du procédé résident dans l'obligation d'utiliser du matériel spécial et suffisamment robuste pour supporter les hautes pressions du gaz, la difficulté à optimiser les différents paramètres, les nombreux brevets et licences, l'utilisation de grades spéciaux, les difficultés de refroidissement dues au pouvoir isolant des mousses.

Le procédé Optifoam™ consiste également à expandre la pièce par une injection contrôlée de gaz carbonique ou d'azote dans le polymère fondu. Schématiquement, le système commercialisé par Sulzer Chemtech comprend :

- un dispositif de préparation et de dosage du gaz ;
- un injecteur annulaire distribuant l'azote ou le gaz carbonique directement dans le fourreau de la presse d'injection ou de l'extrudeuse ;
- un mélangeur statique en sortie de vis améliorant l'homogénéité du mélange et de la température.

8.4.3 Introduction d'air par battage mécanique de dispersions

Le moussage des latex ou des pâtes PVC consiste à introduire mécaniquement de l'air dans le latex par battage en discontinu dans des batteurs à cuves munis de fouets dits pâtisseries ou par battage en continu par passage dans des appareils continus de type Oakes par exemple. La mousse formée est versée dans des moules pour obtenir directement des objets finis ou sur des tapis pour fabriquer des blocs, gélifiée et séchée si nécessaire.

8.5 Création d'alvéoles par dissolution de sels minéraux : éponges celluloses

Le processus de fabrication peut être brièvement résumé de la façon suivante : de la pâte de bois, déchiquetée finement, est imprégnée d'une solution concentrée d'hydroxyde de sodium puis est soumise à différents traitements et à l'addition de cristaux de sulfate de sodium qui formeront les cellules. Après coagulation à la vapeur ou par un procédé électrique, le sulfate de sodium est éliminé par solubilisation pour faire apparaître les trous dans la masse. Après le démoulage, diverses opérations permettent de régénérer la cellulose, qui est essorée, séchée et découpée aux dimensions voulues. Les éponges ainsi obtenues sont capables d'absorber environ 12 fois leur masse d'eau. Le procédé permet la fabrication de produits variés par la forme, le découpage, la porosité, la texture, le renforcement éventuel avec des fibres végétales, la couleur et la résistance mécanique.

8.6 Mousses syntactiques

Dans les mousses syntactiques, la structure cellulaire est obtenue par incorporation de microsphères creuses et, éventuellement, de macrosphères également creuses. Pour ne pas casser les microsphères de verre pendant la transformation, il faut choisir des procédés en phase liquide ne développant que des contraintes limitées et opter pour des polymères de faible viscosité. Les époxydes sont très utilisés pour la flottabilité et l'outillage alors que les polyuréthanes, résines phénoliques et polyesters insaturés sont d'usage

courant. Les polyimides, polycyanates, silicones sont réservés à des utilisations haut de gamme.

La structure particulière confère à la mousse des propriétés spécifiques d'étanchéité et de résistance à la compression hydrostatique jusqu'aux contraintes entraînant la rupture des microsphères. Les cellules en verre des mousses syntactiques restent étanches aux fluides et, en conséquence, les mousses syntactiques sont très peu sensibles à l'immersion dans des liquides n'altérant pas la matrice. Notamment, l'immersion dans l'eau, même aux grandes profondeurs, n'altère pas la masse volumique.

9 • AUTRES PROCÉDÉS : e-MANUFACTURING, TRANSFORMATION DES LIQUIDES

9.1 Prototypage rapide et e-manufacturing, ou fabrication directe

Les délais de mise sur le marché des produits industriels ou grand public sont de plus en plus brefs alors que les frais d'étude doivent diminuer, entraînant le raccourcissement des temps d'étude et la réduction du nombre d'essais préliminaires. En même temps et contradictoirement, le droit à l'erreur doit également diminuer. Les exigences de fiabilité, qualité, prix et aspect nécessitent la réalisation de nombreux prototypes pour s'assurer de l'esthétique, de l'aptitude au montage, à la fonction et à la production.

Le prototypage rapide a pour but de produire plus rapidement et à moindre coût les prototypes de pièces et de moules.

Dans un premier temps, les logiciels de CAO génèrent l'ensemble des données nécessaires à la fabrication. Ensuite, à chaque étape de la phase de conception, les techniques de prototypage rapide produisent très rapidement des maquettes offrant une vision de l'objet final qui permet de valider le coût, la faisabilité technique, le choix marketing, la conception des outillages.

L'*e-manufacturing*, ou fabrication directe, répond à des objectifs encore plus ambitieux puisqu'il s'agit de fabriquer rapidement pour les commercialiser une ou quelques pièces ou même de petites séries en s'affranchissant des méthodes conventionnelles de fabrication des matières plastiques et ceci dans des conditions économiques viables.

Parmi les nombreux procédés, citons sans prétention d'exhaustivité :

- la stéréolithographie, qui consiste à polymériser une résine, couche par couche, par un faisceau laser. Cette technologie est diffusée, par exemple, par 3D Systems, EOS, Laser 3D, Sony, Mitsubishi... ;
- le frittage de poudre : durcissement, couche par couche, d'une poudre (PA, PS, métaux...) par un faisceau laser ;
- l'impression 3D de poudre ;
- le dépôt de matière thermoplastique en fusion, procédé breveté par Stratasys ;
- l'empilage de feuilles de papier collées, procédé LOM ;
- l'enlèvement de matière par usinage à très grande vitesse (UTGV) ou électroérosion ;
- le surmoulage et la coulée sous vide : la cavité du moule est obtenue par surmoulage d'une résine époxy ou silicone sur le modèle positif puis démoulage. Le prototype est ensuite obtenu par injection sous vide d'une résine liquide.

Si l'on dispose d'un modèle, la génération des fichiers CAO et STL peut être faite par digitalisation laser (*reverse engineering*), ce qui permet de dupliquer des objets uniques obtenus manuellement (prothèses, par exemple), de comparer des modifications faites sur un modèle physique (aérodynamisme, par exemple).

9.1.1 Stéréolithographie

L'objet est construit par tranches successives, à partir de celle du bas, dans un réacteur photochimique contenant une résine liquide photosensible se solidifiant par exposition aux UV d'un faisceau laser.

Le réacteur comporte une cuve à niveau constant de monomère liquide et un plateau élévateur (axe Z) commandé pour maintenir une mince pellicule de résine liquide au-dessus des couches précédentes solidifiées.

Le faisceau laser, commandé par le fichier CAO, assure le durcissement local de la résine aux endroits exposés.

Lorsque le balayage laser a été effectué sur une première couche, le plateau support s'enfonce verticalement, en couvrant ainsi la zone durcie d'une mince couche de résine liquide (de l'ordre de 0,07 à 0,75 mm). On peut alors commencer un nouveau cycle.

Après l'étape de stéréolithographie, le modèle reçoit un complément de durcissement et subit un ponçage.

La dimension des pièces dépend du type de machine utilisé, pouvant atteindre plus de $500 \times 500 \times 500$ mm. Les tolérances dimensionnelles peuvent varier entre 0,1 et 0,2 %, suivant la taille du modèle et l'expérience des opérateurs.

9.1.2 Dépôt de fil en fusion, ou Fused Deposition Modeling (FDM)

Une extrudeuse montée sur un système trois axes à mouvements rapides contrôlés en déplacement et en accélération extrude un filament thermoplastique chaud (polyamide, polypropylène ou ABS) de l'ordre de 1 mm de diamètre et le dépose dans un état semi-liquéfié sur un support ou sur les couches précédentes du prototype en cours de réalisation. Le fil se solidifie instantanément par contact avec la couche précédemment déposée et y adhère. Les épaisseurs des strates sont de l'ordre de 0,025 à 0,7 mm et les tolérances sont de +1,27 mm sur les axes X, Y et Z pour une enveloppe cubique de travail de 30 cm de côté. Certaines machines acceptent la cire usinable et la cire perdue, ce qui permet de réaliser des moules de fonderie avec des tolérances de l'ordre de 0,1.

9.1.3 Empilement de couches de papier laminé polypropylène (LOM)

Une feuille de papier laminée avec un film de polypropylène est découpée par laser aux dimensions de la couche du prototype en cours de réalisation puis déposée sur la section précédente et comprimée à chaud. La fusion du polypropylène colle la feuille de papier sur la couche précédente.

9.1.4 Stratoconception® par empilement de couches de matériaux usinables

Des strates, découpées par jet d'eau, laser ou fraisage dans une plaque du matériau choisi, sont assemblées par collage ou fusion. Les machines d'usinage conventionnelles s'avérant suffisantes pour l'obtention des découpes, des prototypes de grandes dimensions peuvent être réalisés.

9.1.5 Frittage de poudre par laser ou faisceau d'électrons

Une poudre plastique, céramique ou métallique mélangée à un liant est partiellement fondue sur le trajet d'un laser thermique ou d'un faisceau d'électrons pour qu'elle puisse s'agglomérer aux endroits voulus par refroidissement. Après construction couche par couche, un traitement thermique peut être utilisé pour améliorer les propriétés mécaniques des pièces et réduire leur porosité.

9.1.6 Impression 3D

Plusieurs systèmes coexistent mais peuvent se ramener au principe de base de la projection et de la fixation de poudre sur un support fixe ou mobile pour former chaque couche du prototype. Des traitements subséquents peuvent être nécessaires pour la consolidation de la pièce. Cette technique se rapproche de celle du frittage de poudre vue précédemment. L'impression 3D est quelquefois utilisée pour la réalisation de moules en céramiques.

Cette technique est souvent décrite comme la photocopieuse 3D permettant à tout un chacun de dupliquer n'importe quel objet en trois dimensions. Les prix baissent continuellement et le but final est de commercialiser des imprimantes suffisamment abordables pour être installées dans tous les bureaux et même à la maison.

9.1.7 Enlèvement de matière par usinage à très grande vitesse (UTGV) ou électroérosion

L'usinage à très grande vitesse (UTGV) en multiaxes ou l'électroérosion de métaux très divers tels qu'aluminium, alliages divers, fonte, acier, Inconel, titane... constituent une autre façon de réaliser rapidement des produits prototypes.

9.1.8 Le surmoulage et la coulée sous vide

Une résine époxy ou silicone est surmoulée sur un modèle positif pour obtenir, après démoulage, un moule dans lequel on injecte sous vide une résine liquide, polyuréthane par exemple, pour obtenir une copie du modèle positif.

Le tableau 9.1 indique quelques éléments concernant les propriétés de certains procédés de prototypage rapide sans aucune prétention de validité intrinsèque et d'exhaustivité car le marché est encore jeune et en continuelle évolution technique et économique.

Tableau 9.1 – Exemples de propriétés de procédés de prototypage rapide.

	Stéréo- lithographie	FDM	LOM	Strato- conception®	Frittage laser de poudres	Impression 3D	UTGV
Coût d'acquisition du procédé (€)	180 000	120 000	180 000	23 000	300 000	82 000	220 000 (machine) + 75 000 (outillage)
Coût de maintenance annuel (€)	6 000	6 000	12 000	17 500	20 000	6 000	4 000
Fournisseurs	3D Systems	Stratasys	Helisis Kira	CITES / Charlyrobot	DTM (3D Systems) EOS Phenix Systems	Z Corporation	Principaux constructeurs de machines- outils
Environnement	Climatisation Absence de vibrations	Climatisation Hygrométrie contrôlée	Hygrométrie contrôlée	Aucune exigence	Climatisation Absence de vibrations	Aucune exigence	Sol très inerte et stable Température contrôlée
Possibilité d'installation dans un bureau	Non	Oui		Non	Non	Oui	Non

Le tableau 9.2 indique quelques exemples de fournisseurs et intervenants.

Tableau 9.2 – Exemples de constructeurs ou d'acteurs.

Société	Site Internet
Association Française de Prototypage Rapide	www.afpr.asso.fr
3D Systems	www.3dsystems.com
Charlyrobot	www.charlyrobot.com
Cubic Technologies	www.cubicttechnologies.com
Desktopfactory	www.desktopfactory.com
Dimension	www.dimensionprinting.com
DTM Corporation	www.dtm-corp.com
EOS	www.eos-gmbh.de
Helisys	www.cubicttechnologies.com
Kira	www.kiraamerica.com
Objet Geometries	www.objet.com
Stratasys	www.stratasys.com
Z-Corporation	www.zcorp.com

9.2 Poudrage

Comme son nom le laisse présager, le procédé de poudrage consiste à créer un revêtement de polymère sur un substrat en utilisant une poudre déposée par projection ou par passage dans un lit fluidisé. Éventuellement, la pièce peut être chauffée et la poudre peut être chargée électriquement. Les installations peuvent atteindre des dimensions très importantes, par exemple des longueurs de 8 m pour des largeurs ou hauteurs de 4 m. La technique est utilisable pour des pièces importantes mais également pour des produits définissant en continu, et une automatisation du processus peut être possible.

Outre les étapes indispensables brièvement évoquées, il peut être nécessaire de procéder à une préparation des pièces et produits pour leur donner les propriétés de surface nécessaires à la bonne adhérence des revêtements.

Suivant les techniques utilisées, les polymères peuvent être de grande diffusion ou plus techniques.

Dans le procédé de poudrage à chaud, la poudre de résine, chargée électriquement ou non, est projetée sur une pièce préalablement préchauffée permettant l'obtention de revêtements de fortes épaisseurs supérieures à 200 µm. Le procédé convient également aux revêtements partiels, aux corps creux fermés, aux pièces de dimensions importantes...

Le poudrage électrostatique utilise de la poudre chargée électriquement et une pièce reliée à la masse. Le dépôt de poudre est ensuite porté à température de fusion dans un four ou une étuve (220 °C par exemple pour du Rilsan). Les épaisseurs sont de l'ordre de 80 à 100 µm et les revêtements partiels sont possibles. Pour les substrats isolants, il est nécessaire de procéder à un prétraitement les rendant conducteurs.

L'enduction en lit fluidisé conduit à des revêtements uniformes en fortes épaisseurs supérieures à 250 µm sur des produits de géométries complexes. La pièce préparée est préchauffée à une température supérieure au point de fusion de la poudre fluidisée dans un bac. Au contact de la pièce chaude, la poudre fond et constitue un film sur l'ensemble de la surface.

À titre d'exemple, une cuve de fluidisation de 7 m de profondeur permet le traitement de pièces jusqu'à 6,5 m de longueur telles que tuyauteries, poutres, barrières... Le procédé convient aux revêtements partiels, aux corps creux fermés, aux pièces de dimensions importantes...

9.3 Injection de poudres métalliques et céramiques : IMM, MIM, CIM, PIM...

Cette technique de moulage des poudres métalliques et d'oxydes minéraux a été développée et souvent brevetée sous différentes appellations et sigles, par exemple :

- Injection Metal Moulding (IMM) ;
- Metal Injection Moulding (MIM) ;
- Ceramic Injection Moulding (CIM) ;
- Powder Injection Moulding (PIM).

Le cycle de fabrication comporte plusieurs étapes :

- préparation d'un compound très riche en poudre métallique ou céramique, le polymère n'intervenant que comme liant provisoire ;
- injection des pièces à l'aide de machines adaptées proposées par les principaux constructeurs de presses ;
- destruction du liant par la chaleur en évitant les distorsions grâce à des supports ou conformateurs adaptés ;
- frittage à haute température, par exemple 1 300 °C pendant plusieurs heures, aboutissant à des pièces à hautes performances.

Les pièces peuvent être ensuite usinées, polies ou traitées avec des revêtements spéciaux.

Les poudres métalliques peuvent être : divers aciers y compris inoxydable, tungstène, bronze, nickel ; et, pour les poudres céramiques : les oxydes de zirconium, aluminium ou encore des oxydes magnétiques, etc.

9.4 Transformation en phase liquide

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

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

9.4.1 Procédé par trempage

Une forme représentant l'objet à reproduire (par exemple une main pour produire des gants) est trempée dans un mélange à base de plastisol ou de latex, puis retirée lentement et séchée plus ou moins complètement avant de recommencer les opérations autant de fois que nécessaire pour obtenir l'épaisseur désirée. Après le dernier trempage, on procède à un séchage complet et, si nécessaire, à un traitement thermique tel qu'un frittage pour les PTFE ou une vulcanisation pour les caoutchoucs. Pour accélérer le dépôt et en augmenter l'épaisseur, il est possible de tremper préalablement la forme dans un bain coagulant ou de la chauffer si le mélange est sensible à la température.

9.4.2 Enduction

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

- enduction avec la dispersion de PTFE employée à l'état pur, l'adhérence entre la couche de PTFE et le support étant réalisée exclusivement par ancrage mécanique ;
- enduction avec des dispersions de PTFE après traitement d'adhésion chimique. Les étapes du procédé deviennent : dégraissage, attaque chimique, rinçage, séchage puis enduction.

Pour l'enduction de tissus au métier à enduire, le tissu est déroulé en continu et est enduit sur une face avec un latex ou une dispersion convenablement épaissis pour assurer un bon compromis entre pénétration dans le tissu et épaisseur d'enduction. Celle-ci est réglée par l'écartement d'un couteau, ou râcle, par rapport au tissu (figure 9.1) ou par la vitesse d'un rouleau encolleur.

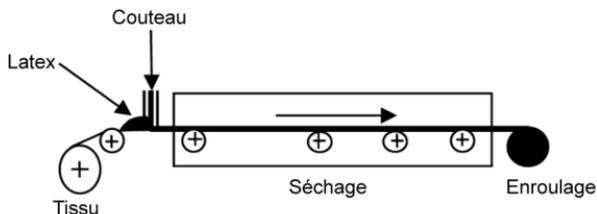


Figure 9.1 – Schéma d'un métier à enduire avec contrôle du revêtement par râcle.

9.4.3 Imprégnation

L'imprégnation de filés, cordes, tresses, tissus et toiles (figure 9.2) peut se faire par immersion de l'article dans la dispersion, séchage et élimination du mouillant par élévation de la température, calandrage, traitement thermique, par exemple frittage à 380-400 °C pour le PTFE. Pour certains emplois, il peut être indispensable d'effectuer à plusieurs reprises une immersion suivie chaque fois d'un séchage. Toujours dans le cas du PTFE, la fixation de 50 à 60 % du poids du tissu de fibres de verre demande environ cinq imprégnations successives. À partir des tissus de fibres de verre imprégnés d'Hostafion, on peut fabriquer des stratifiés par pressage de tissu de fibres de verre

imprégné, empilé en autant d'épaisseurs que nécessaire pour atteindre l'épaisseur totale voulue. Un traitement thermique sous presse à environ 380 °C jusqu'à frittage à cœur complète le processus.

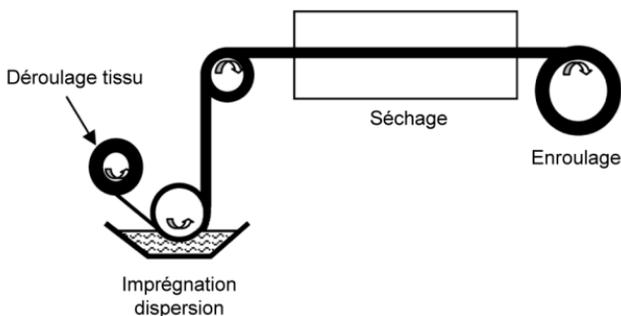


Figure 9.2 – Principe de l'imprégnation en plein bain.

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

9.4.4 Peintures, vernis et revêtements

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

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

Pour former le film de peinture continu et adhérent, il faut, dans un premier temps, provoquer l'évaporation de l'eau, et éventuellement du co-solvant, par un simple mécanisme physique de séchage suivi ou non d'une réaction chimique apportant l'insolubilité du film dans l'eau ou les solvants et le développement des propriétés mécaniques et chimiques optimales du revêtement. Le séchage par évaporation à l'air à température ambiante est un phénomène purement physique qui entraîne la mise en contact des particules de liant entre elles, puis leur réunion, conduisant à un matériau polymère continu. Le phénomène de coalescence nécessite une certaine température, dite « température minimale de formation du film », caractéristique du polymère. Cette température peut être abaissée par des agents de coalescence qui assurent une plastification temporaire.

Le séchage chimique peut être déclenché une fois l'eau évaporée. Cette réaction est destinée à transformer les macromolécules indépendantes du liant en un réseau tridimensionnel qui améliore les propriétés mécaniques, la résistance chimique et la durabilité de la peinture.

Les peintures peuvent être appliquées avec du matériel manuel bien connu ou à l'aide de matériels industriels plus spécifiques.

Le matériel pour mise en œuvre manuelle comprend :

- le pinceau, la brosse, le rouleau, qui sont les outils d'application traditionnels de la peinture sur chantier ou en atelier. Ces outils sont bien adaptés à des surfaces petites ou moyennes et ne nécessitent pas d'investissements notables ;
- la pulvérisation pneumatique, électrostatique, sans air..., qui permet des dépôts plus rapides et plus uniformes convenant d'autant mieux à l'industrialisation que l'automatisation est possible. Les investissements, bien qu'un peu plus importants, restent modestes.

Matériels industriels dédiés : l'application industrielle des peintures peut se faire à l'aide d'installations automatiques plus ou moins sophistiquées qui peuvent conduire à des investissements importants pour l'industrie automobile ou les télécommunications par exemple. Citons, sans prétention d'exhaustivité :

- trempé : la pièce à peindre est immergée dans la peinture, puis égouttée avant de sécher à l'air ou en étuve ;
- rideau et *flow-coat* : la pièce traverse un rideau ou un ensemble de jets mous (*flow-coat* ou aspersion) de peinture avant d'être égouttée puis séchée ;
- pistelage : la peinture peut être pulvérisée par des pistolets ou des bols et disques tournants fixes ou montés sur robots multi-axes ;

- rouleaux : l'application sur des surfaces planes peut se faire avec des techniques proches de l'imprimerie sur tôles (*coil coating*) ou sur panneaux de bois (machines à rouleau).

Le séchage peut se faire :

- dans les conditions ambiantes pour les peintures dites « à séchage à l'air ». Le séchage peut être accéléré par une élévation modérée de la température de l'air, sous l'action d'un rayonnement infrarouge ou encore une ventilation forcée... ;
- par élévation de température pour les peintures dites « à séchage au four ». La température et la durée de séjour de la pièce sont fonctions de la nature de la peinture ;
- par réticulation sous rayonnement (UV, faisceau d'électrons), dans des installations spécifiques, pour les peintures formulées spécialement.

Rappelons que les peintures sont soumises à des contraintes réglementaires spécifiques, prévues par les législations nationales, européennes et internationales : « installations classées » pour la fabrication et le stockage, conformité aux directives REACH, RoHS, interdiction de certains composants, limitations de mise sur le marché, mesures d'hygiène et de sécurité, fiches de données de sécurité, étiquetage de sécurité, transport, valorisation des déchets (déchets de produits et déchets d'emballages), contraintes spécifiques (contact avec les denrées alimentaires, norme « jouets », etc.).

9.4.5 Dépôt de film

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

Une variante du procédé consiste à appliquer la dispersion par pistolement.

10 • PROCÉDÉS DE SECONDE TRANSFORMATION ET DE FINITION

10.1 Thermoformage

Le thermoformage (figure 10.1) consiste à plaquer une feuille de thermoplastique ramollie par la chaleur sur les parois d'un moule pour lui en faire prendre la forme. Le formage peut être réalisé par l'action directe du moule sur la feuille de thermoplastique (emboutissage) ou plus souvent par action combinée avec une aspiration ou une pression facilitant la mise en forme. Après refroidissement partiel ou total, on procède au démoulage et découpage des bords.

Le haut de la figure 10.1 présente la mise en forme d'une feuille ramollie par un dispositif de chauffage, infrarouges par exemple, à l'aide d'un moule mâle faisant office de poinçon. Les deux vues du bas concernent deux autres principes de moule, un moule femelle et un moule en deux parties reprenant le principe de la compression. Ce dernier procédé est également appelé thermocompression.

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

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

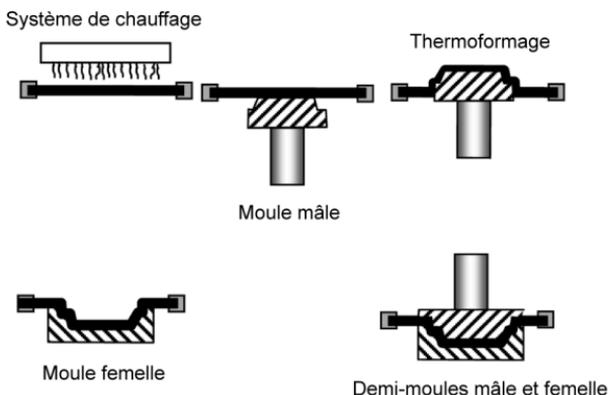


Figure 10.1 – Principe du thermoformage.

supportable pour la fabrication et pour l'utilisation. Les épaisseurs ne sont pas maîtrisées et les tolérances sont larges.

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

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

Le procédé convient du prototype à la grande série à condition d'utiliser le matériel adapté.

Les moules sont peu coûteux mais les feuilles sont chères et les chutes de détourage importantes.

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

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

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

Le tableau 10.1 présente quelques exemples de caractéristiques de thermoformeuses d'usage général montrant la diversité des dimensions des plateaux et des profondeurs d'emboutis.

Tableau 10.1 – Exemples de caractéristiques de thermoformeuses.

Alimentation	Dimensions des plateaux (cm × cm)	Profondeur des emboutis (cm)	Puissance de chauffe (kW/m ²)
Feuille	12 × 20	55	30
Rouleau	17 × 20	5	300
Feuille	20 × 25	15	
Rouleau	20 × 30	10	400
Feuille	30 × 30	30	500
Rouleau	30 × 30	12	500
Rouleau	35 × 50	10	
Feuille	35 × 50	30	
Rouleau	40 × 40	10	
Feuille	40 × 40	10	240
Rouleau	75 × 75	15	320-500
Feuille	75 × 75	15	240
Rouleau	90 × 90	15	400
Feuille	90 × 90	15	500-800
Feuille	90 × 90	60	500
Rouleau	90 × 180	20	350
Feuille	90 × 210	75	600

Tableau 10.1 – Exemples de caractéristiques de thermoformeuses. (suite)

Alimentation	Dimensions des plateaux (cm × cm)	Profondeur des emboutis (cm)	Puissance de chauffe (kW/m ²)
Feuille	90 × 210	175	600
Rouleau	125 × 180	15	500
Feuille	120 × 300	75	400
Feuille	120 × 300	100	800
Feuille	150 × 300	75	600
Feuille	150 × 300	175	600
Feuille	180 × 420	75	600
Feuille	180 × 420	175	600
Feuille	210 × 450	75	600
Feuille	210 × 450	175	600
Feuille	270 × 360	75	600
Feuille	270 × 360	175	600
Feuille	300 × 450	90	
Feuille	300 × 450	120	800
Feuille	300 × 700	90	800
Feuille	300 × 700	150	800
Feuille	700 × 700	60	112

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

- transports : pièces de carrosserie pour voitures, motos, poids lourds ou véhicules spéciaux ; toits de tracteurs, capots, garnitures intérieures... ;
- bureautique : habillages, capots... ;

- appareils électroménagers : portes de réfrigérateurs, portes de maisons, appareils sanitaires... ;
- construction navale : habitacles, coques, planches à voile ;
- aéronautique : pare-brise... ;
- matériel de présentation : PLV, dômes, présentoirs... ;
- emballage : pots de yaourt, plateaux, blisters, moules pour chocolat, pelli- culage, palettes... ;
- matériel industriel : habillages, capots, récipients, conteneurs, viseurs de masques, valises... ;
- divers : masques de carnaval, jouets, tondeuses à gazon...

Le tableau 10.2 indique quelques constructeurs ou distributeurs de matériel de thermoformage.

Tableau 10.2 – Exemples de constructeurs ou distributeurs de matériel.

Société	Site Internet
Abaqueplast	www.abaqueplast.fr
Amut	www.amut.it
Bassompierre Scientax	www.scientax.com
Cannon	www.thecannon-group.com
Dubot Équipement-Wegener France	www.dubot-wegener.com
Fostoria Industries	www.fostoriaindustries.com
Frimo-Huber	www.frimo.de
Geoplast	www.geoplast.com
General Plastics Machines	www.gpm-inc.net
Illig	www.illig-France.fr
Kiefel	www.kiefel.de
Irwin Research & Development	www.irwinresearch.com
Kwalyti Tooling & Machinery	www.kwalyti.com
Matrasur	www.matrasurcomposites.com
Mecaplastic	www.mecaplastic.co.uk
Meico	www.meico.it

Tableau 10.2 – Exemples de constructeurs ou distributeurs de matériel. (suite)

Société	Site Internet
Multivac	www.multivac.com
OEM Press Systems	www.oempresssystemsinc.com
Package Development	www.pkgdev.com
PlastiVac	www.plastivac.com
Stopol	www.stopol.com
Zemat Technology Group	www.zemat.com

10.2 Usinage

L'usinage utilise des demi-produits standards tels que barres, jets, plaques, etc. ou des ébauches produites par les méthodes conventionnelles à partir de moules simplifiés et éventuellement polyvalents. Le procédé convient pour les prototypes et petites séries.

À peu près toutes les méthodes d'usinage des métaux ou du bois, après une plus ou moins grande adaptation des outils et des procédés, sont applicables : sciage, perçage, tournage, fraisage, taraudage, filetage, alésage, meulage, rectification, ponçage, polissage, gravure, toupillage, rabotage, formage à chaud et à froid.

La faible conductivité thermique et l'abaissement des caractéristiques mécaniques à chaud font que chaque matière plastique a une température limite d'usinage qu'il ne faudra pas atteindre, d'où la nécessité d'un refroidissement efficace et d'une limitation de l'avance des outils. Les outillages sont standards mais les cadences de production sont ralenties. Les huiles de coupe conventionnelles peuvent être incompatibles avec certaines familles de polymères et des qualités adaptées doivent alors être adoptées.

L'usinage permet de fabriquer des pièces de dimensions finies limitées par les possibilités des machines d'usinage. Les formes très compliquées peuvent être réalisées à partir d'ébauches dont le moule pourra être simplifié. Les tolérances serrées peuvent être obtenues par rectification.

Normalement, l'aspect est correct sur toute la surface de la pièce mais, en cas d'utilisation de plusieurs techniques d'usinage, chacune peut laisser un état de surface spécifique.

Mis à part les cas particuliers de préformes anisotropes et de méthodes d'usinage insuffisamment adaptées, les pièces sont isotropes. Les propriétés

mécaniques peuvent être dégradées en cas de surchauffe ou de coups d'outils initiant des amorces de craquelures.

10.3 Assemblage

Les moyens d'assemblage peuvent être répartis en trois grandes catégories : méthodes mécaniques (telles qu'encliquetage, emboîtement, clipsage, rivetage, vissage, emmanchement à la presse...), soudage et collage.

Les plastiques ont des aptitudes différentes au soudage et au collage. Notamment, les thermodurcissables ne sont plus soudables après réticulation ou durcissement. Le tableau 10.3 donne certaines indications générales sur l'aptitude à l'assemblage de quelques matières plastiques. Les appréciations sont subjectives et doivent être vérifiées en fonction des grades de plastiques réellement utilisés, du matériel et des produits d'apport effectivement disponibles, de la compétence du personnel. Des préparations de surface et l'application de primaires peuvent être nécessaires.

Tableau 10.3 – Indications générales sur l'aptitude à l'assemblage des plastiques.

	Soudage			Collage
	Thermique	HF	Ultrasons	
ABS	Bon	Moyen à bon	Bon	Bon
Cellulosiques	Bon	Moyen à bon	Moyen	Bon
PA	Bon	Moyen à bon	Bon	Bon
PC	Bon		Bon	Bon
PE-HD	Bon	NON	Moyen	Moyen
PE-BD	Bon	NON	Moyen	Moyen
PET, PBT	Moyen	Moyen à faible	Bon	Moyen
PTFE	Moyen	NON		Difficile
PMMA	Bon	Moyen	Bon	Bon
POM	Bon		Bon	Moyen

Tableau 10.3 – Indications générales sur l'aptitude à l'assemblage des plastiques. (suite)

	Soudage			Collage
	Thermique	HF	Ultrasons	
PP	Bon	NON	Bon	Moyen
PPE	Moyen		Moyen	Bon
PS	Bon	NON	Bon	Bon
PSE	Bon	NON		Bon
TPU	Bon	Moyen		Bon
PVC plastifié	Moyen	Bon	Moyen	Moyen
PVC	Moyen	Bon	Bon	Bon
PVDC	Bon	Moyen à bon	Possible	
PSU	Bon	NON	Bon	Moyen
PEEK			Bon	Possible
LCP			Possible	Possible
PAI			Possible	Possible
PEI	Bon		Bon	Possible
Polyimides				Possible
Mousses PVC		Bon		

Les interfaces des assemblages par collage ou par soudage peuvent constituer :

- des points faibles par manque de cohésion et de mouillage ;
- des points d'attaque privilégiés ;
- des sources de concentrations de contraintes entre un renfort rigide et une matrice plus souple ;
- des sources d'anomalies de fabrication : pollution des surfaces à coller ou à souder...

En conséquence, le soudage et le collage nécessitent presque toujours une préparation de surface.

10.3.1 Préparations de surface

La propreté des surfaces à assembler est une des conditions du succès du collage ou du soudage. La meilleure méthode consiste à éviter la pollution des surfaces pendant la fabrication et le stockage mais, s'il y a eu pollution, les plastiques peuvent être nettoyés par différentes méthodes qui devront être choisies suivant le matériau et son état, notamment le durcissement pour les thermodurcissables y compris les caoutchoucs.

■ Dégraissage

Le dégraissage élimine les graisses, huiles, etc. Il peut se faire au moyen de solvants propres, non gras et compatibles. L'efficacité du dégraissage peut être améliorée en combinant l'action du produit de nettoyage et les ultrasons.

Les solvants doivent être soigneusement choisis pour éviter la dégradation des éléments à assembler ainsi que leur piégeage qui pourrait provoquer ultérieurement des problèmes.

Un ravivage modéré aux solvants est parfois utilisé juste avant collage.

Pour les matières plastiques, le dégraissage par des solutions aqueuses détergentes peut également être utilisé, ce qui a l'avantage de supprimer l'emploi de solvants néfastes pour l'environnement.

■ Traitement mécanique

Le traitement mécanique par abrasion élimine la couche de surface polluée et oxydée. Il se fait souvent par ponçage, mais également par sablage ou grenailage en adaptant le procédé à la matière à traiter. Après le ponçage, un dégraissage est souvent nécessaire.

Dans le cas de substrat à très faible tension de surface, il peut favoriser le piégeage d'air en fond de stries de ponçage ou de sablage.

■ Traitements de surface chimiques et physico-chimiques

Les traitements de surface chimiques et physico-chimiques conduisent souvent aux meilleures performances. Leur but est de créer une nouvelle surface sans modifier les propriétés massiques du substrat. Citons, entre autres :

- les traitements oxydants, souvent sulfochromiques ;
- le flammage par exposition brève à une flamme entre 1 000 et 2 500 °C ;
- les décharges couronnes ou Corona ;

- les plasmas froids de gaz excités sous vide par des décharges électromagnétiques ;
- les ultraviolets : la longueur d'onde doit être adaptée au polymère et un photo-amorceur peut en augmenter l'efficacité. Certains polymères peuvent être dégradés ;
- les faisceaux lasers : l'apport énergétique doit être faible pour ne pas engendrer d'ablation ;
- les faisceaux d'électrons (EB), technique lourde, sont surtout envisagés pour renforcer la liaison fibre/matrice ;
- les traitements par organo-métalliques concernent principalement les polymères fluorés ;
- les traitements divers, notamment pour les articles en caoutchouc contenant des fibres, câblés, nappes ou tissus traités RFL ou des inserts métalliques adhésifs par laitonnage.

10.3.2 Soudage

La soudure est toujours provoquée par la chaleur qui entraîne la fusion des thermoplastiques à l'interface des pièces. Le refroidissement ultérieur conduit à la solidification du matériau et à la solidité du joint si les deux polymères à souder sont compatibles. Les trois paramètres principaux influant sur la qualité sont la température, le temps, la pression de soudage.

Les méthodes varient par la source d'échauffement et l'apport éventuel de matière. Parmi les procédés les plus courants, on peut citer : pistolet à air chaud, miroir, HF, ultrasons, friction, rotation, effet Joule par résistance électrique, laser, électromagnétisme... Les températures de soudage doivent être supportables par les deux matériaux à souder et il faut tenir compte d'un affaiblissement des performances mécaniques au niveau de la soudure.

À titre d'exemple, certaines directives diffusées par les instituts de soudure ou autres organismes définissent des coefficients de réduction des performances mécaniques en cas de soudure. Le tableau 10.4 donne quelques exemples des coefficients de réduction à appliquer sur les contraintes supportables en service, suivant la durée de vie envisagée.

Mis à part, dans une certaine mesure, le soudage ferromagnétique, il est formellement déconseillé de souder des matériaux de natures chimiques différentes. Il est même conseillé de ne souder que des matériaux d'états physico-chimiques aussi voisins que possible.

Pour les thermoplastiques, la présence des fibres perturbe le soudage, qui est peu utilisé.

Tableau 10.4 – Exemples de coefficients de réduction à appliquer sur les contraintes.

Procédé de soudure	Durée de service	PE-HD	PP	PVC	PVCC	PVDF
Éléments chauffants	Courte	0,9	0,9	0,9	0,8	0,9
	Longue	0,8	0,8	0,6	0,6	0,6
Gaz chaud	Courte	0,8	0,8	0,8	0,7	0,8
	Longue	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4

Un soin particulier doit être apporté à la propreté : il ne faut pas hésiter à nettoyer et même raviver par abrasion les surfaces à souder. Pour des pièces anciennes, il faut carrément enlever la surface pour accéder à de la matière non oxydée ou non corrodée. Dans la réparation de cuves, tuyaux..., il peut être impossible de ressouder si des produits ont imprégné la matière à cœur.

■ Apport direct de chaleur

L'apport direct de chaleur peut se faire par différentes techniques :

- miroir, raquettes chauffantes ;
- air chaud et cordon d'apport de la même matière que les parties à souder par chalumeau électrique avec dispositif de pose du cordon : la soudure exécutée correctement permet d'atteindre des facteurs de soudage (pourcentage de la résistance du joint par rapport à la résistance à la rupture du matériau d'origine) de 75 à 90 % pour le PVC, 65 à 90 % pour du PP, 50 à 100 % pour du PE ;
- impulsion de chaleur : pinces à souder les films.

■ Soudage HF

Les thermoplastiques dont l'angle de perte est élevé peuvent être soudés dans un champ HF : la chaleur est développée à la lame d'air entre les deux surfaces à souder. Cette méthode est très utilisée pour le soudage de feuilles PVC pour habillement, sacs, objets gonflables, emballages...

■ Soudage laser

Le laser génère de la chaleur au niveau de l'interface si la première pièce est transparente au rayon laser alors que la deuxième est absorbante. La chaleur générée assure la soudure dont la solidité est acquise pendant le refroidissement si les deux matériaux sont compatibles. Il est possible d'assembler deux pièces transparentes entre elles en utilisant un vernis absorbant déposé à l'interface.

■ Électromagnétisme

On interpose entre les deux surfaces à souder, un joint du même thermoplastique contenant des particules ferromagnétiques. En passant dans une bobine d'induction, le joint fond et provoque la fusion des surfaces en contact. Cette technique permet, dans une certaine mesure, la soudure de matières chimiquement différentes.

■ Apport de chaleur par frottement

La génération de chaleur peut être provoquée par ultrasons, rotation, friction, vibration.

Les ultrasons (de 20 à 30 kHz) provoquent l'échauffement à l'interface. La sonotrode n'excite pas forcément directement la soudure, qui peut être éloignée (« soudage lointain »). La rotation s'applique aux objets circulaires. La section de soudage doit être bien étudiée et la rigidité des matériaux doit être convenable.

■ Effet Joule

Un courant électrique traverse une résistance électrique noyée dans un manchon du thermoplastique et provoque sa fusion par effet Joule. Les applications sont très spécifiques, particulièrement le soudage des tuyaux à gaz en polyéthylène.

10.3.3 Collage

Le collage peut être effectué à l'aide d'un solvant, de colle ou d'adhésif, de ruban adhésif, d'un matériau de liaison. Les solvants ou les monomères doivent être utilisés avec précaution pour les matières sensibles au *stress cracking*.

Le collage ne présente pas, en apparence, de difficultés particulières et est utilisé pour des assemblages composite/composite et composite/métal à fonctions

structurelles, par exemple assemblage d'un bandeau métallique et d'une superstructure en composite sandwich renforcé fibres de verre sur une frégate construite par la DCN. L'assemblage par collage évite l'endommagement du composite par perçage et permet une excellente répartition des efforts.

Pour le collage, l'adhésif étant correctement choisi, il faut veiller à faire travailler les joints collés en cisaillement et non en pelage et il faut s'assurer que les surfaces collées, soigneusement préparées, sont suffisantes pour supporter les efforts. Dans tous les cas, il faut se rappeler que les contraintes supportables en continu ou en régime dynamique sont nettement inférieures à celles qui peuvent être supportées instantanément.

Les primaires d'adhésion permettent de créer une couche macromoléculaire riche en sites réactifs à l'interface avec un substrat peu réactif et de faible tension superficielle. Une fois les pièces traitées, leur manipulation doit se faire avec précaution (éviter les traces de doigts) et le collage doit être effectué, si possible, aussitôt après le traitement. Dans le cas contraire, il faut prévoir un stockage dans un endroit tempéré, le plus propre et sec possible.

Les adhésifs mettent en œuvre différents processus d'adhésion. Citons parmi les plus courants :

- adhésifs thermofusibles : l'adhésif fondu, mis en contact avec les pièces à coller, mouille les surfaces à assembler et les solidarise en redevenant solide par refroidissement. Il faut vérifier que les matériaux à assembler supportent la température de l'adhésif fondu sans dégradation. Le joint de colle reste sensible à la température, qui entraîne son ramollissement puis sa fusion sauf pour les qualités réticulables convenablement réticulées ;
- solvants ou adhésifs non réactifs en solution : l'adhésif peut être la matière plastique elle-même ou un autre composé, plastique ou caoutchouc. Le solvant mouille les surfaces à assembler puis s'évapore, entraînant la solidification des pièces à assembler. La tenue à la chaleur est, en général, moyenne. Si le solvant est également solvant des matériaux à assembler, il peut y avoir migration dans les matériaux et fissuration par relaxation des contraintes internes résiduelles ;
- adhésifs réactifs : après mouillage des surfaces à assembler, le joint de colle polymérise ou réticule pour assurer la solidité de l'assemblage. La tenue à la chaleur peut être meilleure que celle obtenue avec les méthodes précédentes. Les dissolutions sont des mélanges vulcanisables de caoutchouc dissous dans un solvant. La vulcanisation peut être réalisée à température ordinaire (dissolution autovulcanisante) ou à chaud ;
- rubans adhésifs : simple ou double face ou transferts, compacts ou moussés, ils permettent l'assemblage souple de matériaux aussi différents

que métaux et plastiques avec possibilités d'importants rattrapages de jeux et compensation des contraintes de dilatation pour les mousses adhésives. Les joints sont faciles à poser avec des épaisseurs régulières conditionnées par l'épaisseur du ruban.

Le matériel d'application varie en fonction des conditions opératoires, de la nature et de la présentation (mono-composant ou bi-composants) des adhésifs utilisés. L'application peut utiliser des moyens très simples tels que pinceau, buse dévidoir, pulvérisation ou des systèmes plus sophistiqués permettant d'assurer de très hautes cadences tels que pompes à pistons, pompes à engrenage, plateaux suiveurs ou roues à vide...

Si nécessaire, la prise de l'adhésif fera appel à du matériel adapté à l'adhésif utilisé pour qu'il atteigne ses caractéristiques maximales le plus rapidement possible.

Les trois grands principes de durcissement ou de prise sont :

- le déclenchement de réactions chimiques, polymérisation ou réticulation, qui peut être activé par la chaleur, les UV, etc. ;
- l'évaporation du solvant ;
- le refroidissement pour les thermofusibles.

Les techniques classiques de durcissement ressortent du passage dans un four, du chauffage par résistance, etc. mais des techniques plus sophistiquées se sont développées telles que :

- chauffage par induction magnétique ;
- chauffage par micro-ondes ;
- chauffage par infrarouge ;
- chauffage par effet diélectrique ;
- photopolymérisation sous rayonnement ultraviolet ;
- polymérisation sous rayonnement .

10.3.4 Assemblage mécanique

La résilience de certains thermoplastiques permet leur assemblage par emboîtement, clipsage ou encliquetage. Pour permettre un assemblage facile, l'angle d'assemblage doit être faible, inférieur à 30° en général, et les déformations doivent être très inférieures à la limite d'élasticité. L'angle de retenue sera fonction des propriétés de démontage désirées. Un angle de retenue faible conduira à un assemblage fréquemment démontable alors qu'un angle de retenue voisin de 90° rendra l'assemblage indémontable.

Deux techniques de rivetage sont utilisées : à chaud avec préchauffage du rivet puis écrasement de la tête ; aux ultrasons, qui donnent en général de meilleures propriétés et longévités. Le rivet, s'il n'est pas de la même matière que la pièce, doit avoir un coefficient de dilatation compatible pour ne pas entraîner de contraintes ultérieures.

Le vissage peut utiliser des vis autotaraudeuses ou des inserts. Dans les deux cas, des règles de conception sont à respecter pour le type de vis et d'insert, l'alésage, l'emplacement dans la pièce et les couples de serrage. Le vissage sur inserts permet les vissages/dévisagements, des couples de serrage plus élevés et limite les risques d'éclatement. Les dévisagements et revissages répétés sont déconseillés pour les vis autotaraudeuses.

Sous réserve d'un calcul correct des diamètres à adopter, les emmanchements métal/plastique donnent de bons résultats. La longévité est conditionnée par la tenue au fluage du thermoplastique considéré. Les éléments métalliques doivent être ronds, lisses, propres et le métal doit être compatible avec le plastique choisi. Le bossage doit être éloigné des lignes de soudure et le moulage doit être particulièrement soigné pour limiter les contraintes résiduelles.

10.4 Chaudronnage, confection

Le chaudronnage plastique est tout à fait comparable à celui des métaux, permettant la réalisation de pièces de formes géométriques simples et déviables, par formage à froid ou à chaud, puis assemblage par soudage ou collage de plaques, tubes et ébauches. Cette technique permet de réaliser des cuves, citernes, gaines, etc. de dimensions qui peuvent être très importantes, du prototype jusqu'à la moyenne série.

La confection est souvent utilisée pour des produits souples tels que les articles gonflables, bâches, revêtements internes de protection de cuves ou de parcs d'épandage, etc.

La mise en œuvre demande une bonne connaissance des matériaux, une grande expérience et une main-d'œuvre qualifiée et soigneuse.

Les thermoplastiques les plus utilisés sont les PVC, PVCC, PE, PP, PVDF, PMMA, PC.

10.5 Finition, décoration, impression, réticulation, protection...

Alors que la décoration a principalement un but esthétique mais peut également avoir un rôle de protection ou un intérêt sécuritaire (reconnaissance par la couleur), l'impression a souvent un rôle informatif. L'une comme l'autre ne posent pas de problèmes particuliers sauf pour les pièces à faible tension de surface et les matériaux hautement déformables, qui doivent être imprimés ou décorés à l'état déformé pour assurer la fidélité des motifs et impressions. Les matériaux de décoration utilisés doivent être suffisamment élastiques et adhérents pour supporter les déformations de l'article à décorer ou imprimer. Tous les procédés habituels d'impression sont utilisables, par exemple : sérigraphie, tampographie, flexographie, marquage à chaud, impression offset, marquage laser, transfert, jet d'encre, sublimation de pigments 3D, etc.

Les revêtements de surface sont utilisés pour la décoration, la protection, la modification des propriétés surfaciques par exemple : amélioration de la tenue au vieillissement, de la résistance chimique, de la tenue à l'abrasion, de l'isolation électrique ou au contraire de la conductibilité, de l'anti-adhérence. Dans le cas des composites, le *gelcoat* joue à la fois ce rôle de protection et améliore l'esthétique.

Les méthodes utilisées, continues ou non, sont nombreuses mais ne donnent pas toutes les mêmes propriétés au revêtement.

Le trempage peut s'effectuer :

- dans un bain de peinture, plastisol (pâte de PVC), dispersion, solution, latex, etc. Un traitement ultérieur par la chaleur est presque toujours nécessaire pour gélification, séchage ou réticulation ;
- dans un lit fluidisé de poudre de PE ou PA11, la pièce devant être assez chaude pour assurer la fusion de la poudre.

La projection peut faire appel à des poudres de PE ou PA11 ou à des peintures, plastisols, dispersions, vernis, latex. Après séchage, le film n'est pas forcément continu, et le revêtement ne peut alors être anticorrosion, cas du PTFE par exemple, qui donne dans ces conditions des propriétés anti-adhérentes mais non anticorrosion.

L'enduction utilise des plastisols, dispersions, latex, etc. et sert notamment à la fabrication des tissus enduits.

La coextrusion ou laminage conduit à des multicouches ayant des propriétés complémentaires. Par exemple, des films de PVDF protègent efficacement l'ABS contre la lumière et les intempéries.

La métallisation, qui peut avoir des buts décoratifs ou techniques, notamment conduction électrique, blindage électromagnétique, utilise des techniques :

- électrolytiques ;
- de dépôt ionique mais il faut ensuite appliquer un vernis de protection sur le dépôt métallique ;
- de projection de métal en fusion ;
- de peintures conductrices (à l'argent ou autres métaux) utilisées pour les blindages électromagnétiques. Celles à base de métaux oxydables (cuivre, nickel, par exemple) devront être protégées par un vernis pour assurer la permanence de la conductivité.

La décoration dans le moule ainsi que l'étiquetage dans le moule (In Mould Decoration, In Mould Labelling) utilisent des films décorés ou imprimés exactement positionnés dans le moule avant l'injection. Le remplissage avec le plastique chaud et fondu provoque l'adhésion.

La peinture des pièces plastiques utilise toutes les techniques, par exemple pulvérisation, trempage simple ou électrolytique, dépôt à la brosse, au pinceau, au rouleau, sublimation, infiltration...

Le choix des procédés et des qualités des matériaux d'apport découlent des compatibilités physiques et chimiques notamment de la tenue à la chaleur, aux UV ou autres radiations éventuellement nécessaires au durcissement des matériaux d'apport, des fonctionnalités attendues du revêtement, des possibilités réelles d'application.

10.6 Réparation

La réparation est surtout utilisée pour les grandes pièces thermoplastiques, thermodurcissables ou composites dont le remplacement serait économiquement injustifié, par exemple coque de bateau, revêtement anticorrosion de cuve de grande contenance, géomembrane, bande transporteuse de grande longueur, élément d'avion, etc.

Les composites de grande diffusion ou à performances intermédiaires peuvent être réparés correctement par un bon professionnel. Les dommages superficiels peuvent nécessiter masticage, ponçage puis protection par *gelcoat* ou peinture. Les dégâts profonds nécessitent l'élimination de la couche

souillée par le milieu extérieur (par exemple, eau pour les bateaux, produits chimiques pour les cuves et réservoirs) puis la re-stratification *in situ* pour remplacer les renforts détruits et enfin la reconstitution de la couche de surface comme pour les dommages superficiels.

Pour les composites hautes performances ou les sandwichs, les réparations, lorsqu'elles sont possibles, sont toujours beaucoup plus délicates.

Les composites peuvent également servir à la réparation ou la consolidation de pièces ou d'ensembles constitués d'autres matériaux, par exemple :

- réparation de structures métalliques offshore par des plaques de renfort en époxy renforcé fibres de carbone (EP/FC) utilisé pour sa légèreté, facilité de fabrication et de durcissement à l'ambiante sur place, ce qui compense le prix élevé dans des conditions difficiles de réparation ;
- réparation ou augmentation des performances de bâtiments ou d'ouvrages existants par des plaques de renfort en préimprégnés EP/FC ;
- réhabilitation de conduites sans ouverture de tranchée par utilisation de chaussettes non durcies : les gaines introduites dans la canalisation à réhabiliter sont plaquées sur la paroi par l'eau, la vapeur ou l'air sous pression et sont durcies par l'eau chaude, la vapeur ou les UV...

C

Éléments prospectifs

11 • TENDANCES

La transformation des plastiques et composites ne peut pas être isolée de son contexte car elle dépend de multiples facteurs comprenant évidemment les polymères utilisés, les pièces fabriquées, les séries à produire, etc. D'autre part, comme toute activité industrielle, la transformation est soumise à des impératifs techniques, économiques et environnementaux formant un contexte évolutif dans le temps et l'espace suivant les fluctuations des économies mondiales ou régionales et la progression des exigences environnementales.

Mis à part les problèmes universels de coût, qualité, rapidité, efficacité, les tendances à plus ou moins long terme devraient obéir au concept général de l'éco-conception incluant :

- une conception mécanique favorisant les économies de matière, la fiabilité, la durée de vie, la facilité de démantèlement et la valorisation des déchets de fin de vie ;
- l'économie des ressources de matières et d'énergie ;
- une transformation aisée et rapide économisant les étapes de fabrication et ménageant les propriétés finales des produits élaborés ;
- une gestion et une valorisation des déchets et produits hors spécifications privilégiant la réparation et le recyclage productif ;
- le choix de polymères et additifs respectueux de l'environnement minimisant la pollution et privilégiant les ressources renouvelables ;
- l'utilisation de pièces et produits générant des économies d'énergie de fonctionnement (allègement des véhicules, allègement des emballages, isolation thermique et électrique...).

Il faut remarquer que ces critères sont interdépendants, pouvant créer des synergies, de simples complémentarités ou, au contraire, peuvent induire des antagonismes.

Quelques-uns de ces points méritent un examen plus approfondi.

11.1 Évolution du contexte général

11.1.1 Conception des pièces et produits

La conception des pièces et outillages fait de plus en plus appel à des logiciels de conception, modélisation et simulation permettant d'optimiser les pièces elles-mêmes ainsi que les outillages, qui ne peuvent en être dissociés. Certains codes de calcul et de simulation incluent des versions prenant en compte la viscoélasticité et le comportement aux grandes déformations des polymères.

Deux autres points sont particulièrement importants et influencent les méthodes de transformation : le niveau initial de propriétés du compound et la durabilité en service.

■ Renforcement

Le renforcement peut être envisagé *in situ* par incorporation de fibres, nano-charges, etc. ou par adoption d'un dessin particulier.

Pour un compound donné, la conception offre de multiples possibilités d'amélioration des propriétés initiales des pièces, par exemple :

- renforcement des surfaces planes par des nervures raidissantes ;
- amélioration de la résistance au choc par des congés de raccordement plus importants ;
- optimisation des bossages et ancrages mécaniques ;
- progressivité des variations d'épaisseurs dans une même pièce ;
- étude des modes d'assemblage (inserts, collage, soudage...), etc.

L'amélioration des propriétés initiales passe également par la bonne utilisation des agents de renforcement. Les améliorations les plus fréquentes concernent le renforcement de la rigidité et des propriétés mécaniques, la résistance aux chocs et le comportement à basse température, qui peuvent être obtenus avec des fibres, des charges minérales, des plastifiants et des modifiants choc.

Le but du renforcement avec des fibres est d'améliorer les propriétés mécaniques, d'augmenter les températures de fléchissement sous charge, de réduire la tendance au fluage, de diminuer les consommations de matière pour une même rigidité.

Les fibres de verre sont les plus utilisées avec 95 % de la consommation mais les fibres de carbone (environ 5 %), actuellement réservées aux applications hautement techniques, se démocratiseront vraisemblablement dans les prochaines années.

Les fibres d'aramide jouent un rôle intermédiaire alors que les fibres naturelles d'origine végétale ne représentent encore qu'une très faible part mais sont l'objet de nombreuses études et nombreux développements.

Quelle que soit la nature de la fibre, le renforcement dépend de son coefficient de forme (fibres courtes ou longues, continues ou discontinues), du taux de fibres, de l'ensimage ou du traitement assurant l'adhésion à la matrice, de la longueur réelle des fibres dans la pièce finale, de la qualité de la dispersion ou de l'orientation des fibres, de l'anisotropie dans la pièce finale.

Par rapport aux fibres de verre courtes, les fibres de carbone courtes mènent à des taux élevés de renforcement pour le module et la résistance à la traction mais la résistance aux chocs diminue. Le coût est nettement plus élevé mais la densité est plus faible.

Les fibres d'aramide occupent une position intermédiaire amenant, par rapport aux fibres de verre, un allègement de l'ordre de 10 %, un renforcement du même ordre, un coût plus élevé, une absorption d'humidité plus forte.

Les fibres naturelles, outre l'intérêt de provenir de sources renouvelables, offrent quelques autres avantages techniques sur les fibres de verre, par exemple : la plus faible densité, un effet abrasif plus modéré, une atténuation des problèmes respiratoires sauf exceptions. Le pouvoir de renforcement est toutefois modeste et le comportement en milieu humide peut poser quelques problèmes.

Les nanocharges représentent un nouveau mode de renforcement nécessitant de nouvelles méthodes de mise en œuvre pour obtenir leur pleine efficacité. Les qualités principales des nanocharges sont les faibles taux d'incorporation, des propriétés thermomécaniques intermédiaires entre celles du polymère pur et celles de composites à base de fibres de verre courtes, une faible augmentation de la densité, une meilleure imperméabilité aux gaz, un meilleur comportement au feu.

L'ensemble des techniques exposées permet la réalisation d'une vaste palette de compounds avec des performances mécaniques très diverses et des méthodes de transformation traditionnelles ou spécifiques.

■ Durabilité

Une solution élégante pour diminuer la pollution et la consommation des ressources consiste à prolonger la durée de vie sans sacrifier les performances et les critères de fin de vie. Il est évident que si l'on double la durée de service d'une pièce, il faudra à terme fabriquer moitié moins de cette pièce et les consommations de matières premières ainsi que les déchets de fin de vie seront divisés par deux. Les possibilités d'amélioration sont de trois ordres : formulation, conception des pièces, transformation.

La formulation joue sur la nature du polymère de base et l'utilisation d'additifs tels que stabilisants, agents de protection, antioxydants, anti-UV, stabilisants à l'hydrolyse, anti-fatigue...

La transformation peut être optimisée pour diminuer les contraintes mécaniques et thermiques pendant la mise en œuvre, réduisant l'oxydation et la dépolymérisation. Notamment, l'incorporation de plusieurs étapes de mise en œuvre en une seule opération est particulièrement efficace.

11.1.2 Transformation économisant l'énergie et autres ressources

Les économies de ressources proviennent des gains sur les énergies de mise en œuvre, la consommation d'eau et autres produits accessoires, les épaisseurs de paroi qui réduisent les masses des pièces tout en satisfaisant aux exigences de service.

Les économies d'énergie de transformation peuvent provenir du matériel et de son exploitation, du transfert de techniques et de l'adaptation de la formulation avec utilisation de lubrifiants, plastifiants, aides à la mise en œuvre, choix de grades à rhéologie optimisée.

La diminution du travail de cisaillement pendant l'extrusion, l'injection et le calandrage, et l'abaissement des températures de mise en œuvre préservent les masses moléculaires et réduisent l'oxydation, les scissions et les cyclisations

L'intégration en ligne des étapes de fabrication permet d'éviter les reprises à froid de compounds, supprimant les contraintes de cisaillement et les remontées en température correspondantes qui dégradent inutilement les polymères. Un excellent exemple concerne la préparation et le mélangeage directement sur la ligne d'injection des thermoplastiques renforcés fibres longues, ou LFRT. La méthode conventionnelle discontinue exige un premier mélangeage du thermoplastique et des fibres longues, un refroidissement et un stockage

puis, au moment de l'injection, un deuxième chauffage et un nouveau travail mécanique qui sont supprimés dans le procédé continu.

De même, l'intégration des opérations de deuxième transformation dans la ligne de première transformation supprime le réchauffage.

Enfin, l'intégration des étapes de finition dans les processus de transformation peut également alléger les passés thermiques et mécaniques du polymère. Pour les économies d'énergie de transformation imputables au matériel, on peut citer des exemples aussi divers que le remplacement des presses d'injection hydrauliques par des presses « tout électrique » ou le remplacement des lampes UV conventionnelles par des LED-UV pour la prise des adhésifs sous irradiation UV.

L'utilisation de polymères liquides doit faire l'objet d'examen approfondis du bilan énergétique, l'avantage de la faible énergie mécanique pouvant être annihilé par l'évaporation de l'eau, grande consommatrice de calories.

11.1.3 Gestion et valorisation des déchets

Une démarche d'éco-conception doit privilégier la meilleure valorisation possible des pièces non conformes, en général dans l'ordre décroissant suivant : réparation après endommagement ou usure partielle, reconstruction, recyclage par remise en production dans les mêmes types de fabrication ou à défaut dans des applications moins exigeantes, compostage ou incinération avec récupération d'énergie ou de sous-produits.

Les mesures efficaces en ce sens doivent être prises dès la conception pour faciliter la réparation, le démantèlement, le tri des matériaux et le recyclage.

■ Réparation

Contrairement à certaines idées reçues, beaucoup de pièces techniques sont réparables et effectivement réparées telles que les composites pour la marine et l'aviation, les membranes d'étanchéité de parcs de rétention, les liners de piscines, les revêtements anticorrosion de cuves, les pneumatiques rechapés pour avions, poids lourds, véhicules de tourisme, les bandes transporteuses... Bien souvent, le problème économique est le principal obstacle, la réparation d'une petite pièce étant plus onéreuse que son remplacement par une pièce neuve. La réparation est souvent réservée aux pièces coûteuses avec des délais de livraison inacceptables ou conditionnant des interruptions de production onéreuses ou exclues.

D'un point de vue environnemental, la réparation est la forme la plus intelligente du recyclage en raison des économies de matières premières, d'énergie

et de pollution. Les mesures efficaces doivent être prises dès la conception pour la rendre techniquement et économiquement possible.

■ Recyclage

Le recyclage des polymères est particulièrement complexe pour plusieurs types de raisons telles que la dissémination des sources, la difficulté du tri, l'incompatibilité entre familles de matières (par exemple, PE, PP, PVC, PS, PET, ABS, PA, PC, PMMA, POM, PBT), la pollution des matériaux, le coût final qui doit être très compétitif par rapport aux mêmes matériaux vierges.

Heureusement, des solutions se mettent progressivement en place, adaptées aux différents flux de déchets sous l'impulsion des pouvoirs publics, grâce aux prises de conscience du grand public et au renchérissement des matières premières vierges et de l'énergie.

En 2006, la récupération des plastiques, comprenant le recyclage et la production d'énergie, a atteint pour la première fois 50 % des déchets plastiques en Europe, mais le recyclage n'a compté que pour 20 % contre 30 % pour la production d'énergie.

Le recyclage mécanique, presque systématiquement appliqué aux déchets de fabrication, est le plus simple et le plus valorisant surtout si les déchets sont réincorporés dans la fabrication d'origine. Dans la mesure où le tri et le nettoyage sont efficaces, la remise à niveau des propriétés est possible grâce à l'arsenal d'additifs généraux ou spécifiques disponibles sur le marché : compatibilisants, agents anti-chocs, plastifiants, agents de protection, stabilisants, antioxydants, anti-UV, agents modifiant la rhéologie, agents renforçants, colorants, agents de matage, agents odorants...

Des points de vue économique et environnemental, le recyclage mécanique est une solution très intéressante. Par exemple, plusieurs rapports britanniques sur le polyéthylène concluent entre autres que :

- la production de sacs de sortie de caisse à partir de recyclé plutôt que de polyéthylène vierge diminue la consommation d'énergie de 60 % ;
- les émissions d'anhydride sulfureux, d'oxyde d'azote et d'anhydride carbonique sont sérieusement réduites ;
- 1,8 t de pétrole peut être économisée pour chaque tonne de polyéthylène réutilisé.

Mis à part le recyclage mécanique, il existe d'autres voies comme la chemo-lyse, la thermolyse et l'extraction par solvants, beaucoup moins directes et dont l'effet de valorisation augmente d'autant que les sous-produits sont sophistiqués, les carburants alternatifs étant les moins intéressants.

11.1.4 Utilisation de polymères et additifs issus de sources renouvelables

Le but est de remplacer le pétrole brut utilisé pour la synthèse des polymères par des plantes renouvelables. Les exemples industriels existent déjà, le coton étant peut-être le plus connu mais le caoutchouc naturel en est un autre fort différent. Pour tous les produits issus de sources naturelles, le niveau des propriétés peut varier dans le temps et suivant l'origine des produits, nécessitant une révision de la politique qualité de l'ensemble de la filière et de la transformation en particulier.

Les possibilités techniques sont nombreuses et ressortent de plusieurs voies :

- fabrication directe de polymères par voie microbienne ;
- fabrication de constituants utilisés dans la synthèse conventionnelle des polymères et additifs ;
- transformation des produits naturels pour les incorporer ensuite dans des polymères industriels ;
- coupage de polymères renouvelables et de polymères d'origine pétrolière...

Malgré l'explosion de solutions tous azimuts, la diversité des molécules issues de sources renouvelables disponibles ou potentielles reste plus limitée que celle résultant de la synthèse à partir du pétrole.

Si certains polymères issus de sources renouvelables ont des propriétés très proches des plastiques issus du pétrole, d'autres nécessitent l'examen d'un œil neuf de leur utilisation et de leur transformation, par exemple les dérivés de l'amidon et de l'acide polylactique (PLA).

Les fibres naturelles sont obtenues par traitement du bois, des feuilles (sisal, banane, palme), des graines (coton, fibre de coco, kapok) ou des déchets des fibres naturelles d'autres secteurs industriels, par exemple déchets de tissus de coton, bagasse... Les fibres végétales naturelles peuvent être chimiquement modifiées pour donner la rayonne, ou viscose.

Pour quelques propriétés techniques, les fibres naturelles ne sont pas aussi performantes que les fibres de verre, ce qui nécessite l'augmentation des taux de renforcement et/ou l'augmentation des sections travaillantes et donc du poids des pièces.

De nombreux additifs peuvent également être obtenus par transformation chimique de produits naturels ou synthétisés à partir d'intermédiaires d'origine naturelle.

11.2 Grands axes d'évolution des procédés de transformation

Les grands axes d'évolution des procédés de transformation découlent soit des progrès techniques des procédés eux-mêmes, soit des tendances générales exposées précédemment et concernent :

- la réduction des coûts par action sur les matières premières, la consommation d'énergie, la réduction des déchets et des non-conformités, l'automatisation, l'intégration de fonction, le recyclage ;
- la rapidité de la fabrication, qui passe par une révision des principes de conception réduisant les étapes et facilitant la fabrication, la réduction des temps de cycle, les techniques « in mould » (décoration, étiquetage, assemblage dans le moule...), la co-transformation (comoulage, coextrusion), l'*e-manufacturing*, ou fabrication rapide, etc. ;
- la facilité de transformation grâce à l'utilisation de la modélisation des écoulements et transferts thermiques pour la conception des outillages, à l'utilisation de grades de faible viscosité, au contrôle en ligne et au pilotage automatique des unités de fabrication, à l'adoption de procédés alternatifs... ;
- la réduction de la pollution, qui doit être prise au sens large, ne se limitant plus à la diffusion d'éléments toxiques mais s'étendant aux empreintes carbone et eau, ainsi qu'au remplacement des polymères et ingrédients d'origine pétrolière par des produits issus de sources renouvelables.

Les procédés alternatifs peuvent être des variantes de techniques connues, des applications de procédés connus à des fabrications qui étaient jusqu'alors réalisées par d'autres procédés ou encore des procédés entièrement nouveaux. Citons à titre d'exemples, sans prétention d'exhaustivité :

- le développement et la vulgarisation de logiciels de conception, de simulation et de conduite de machines et d'ateliers ;
- l'automatisation tous azimuts ;
- l'intégration des étapes de fabrication ;
- l'injection assistée gaz, eau ou autres fluides sous des formes plus ou moins complexes, telles que GAIM (Gas Assisted Injection Moulding), Cryo-GAIM (GAIM avec gaz refroidi aux températures cryogéniques), injection de gaz supercritiques ;
- le procédé PIT (Projectile Injection Technology), dans lequel un noyau escamotable (projectile) remplace le fluide des procédés GAIM ;

- l'injection lamellaire conduisant à une structure en mille-feuille ;
- l'Exjection® (voir § 3.6.5) ;
- la course au gigantisme ou, au contraire, au nanisme ;
- la généralisation du « tout électrique » ou l'utilisation de matériel hybride pour certains cas spécifiques ;
- le thermoformage des réservoirs ou des bouteilles, au lieu des traditionnelles méthodes de soufflage ;
- les microcellulaires ;
- les mélangeurs statiques incorporés à l'extrusion ou l'injection ;
- le thermoformage par le procédé Twin Sheet, permettant de former simultanément les deux coques d'une pièce creuse et de les souder ;
- l'*e-manufacturing* ;
- les structures hybrides associant plastiques et matériaux aussi divers que les métaux, le verre, le bois ;
- la coulée de polyamides sous faible pression (Quadrant Engineering Plastic Products) ;
- procédé direct ETAA (Coperion, DSM, DaimlerChrysler), de mélangeage, extrusion et injection de thermodurcissables ;
- procédés d'injection de poudres métalliques, par exemple Catamold® (BASF) ;
- l'imprimante 3D personnelle adaptée aux besoins de tout un chacun comme l'impression 2D l'a été dans la précédente décennie...

11.3 Dix exemples illustrant quelques-unes des nouvelles tendances

Parmi beaucoup d'autres, nous citons dix exemples relevant de cinq tendances différentes.

11.3.1 Intégration du mélangeage sur la ligne de transformation

L'intégration des opérations de mélangeage sur les lignes de transformation existe depuis longtemps en ce qui concerne les colorants mais s'étend et se diversifie grâce à la versatilité des modèles de doseurs-alimentateurs et à la multiplication des ingrédients utilisables simultanément sur le même matériel de transformation comme on peut le voir sur les figures 11.1 et 11.2.



Figure 11.1 – Exemples de dispositifs d'alimentation de matériel de transformation
(avec l'aimable autorisation de K-Tron).



Figure 11.2 – Exemple de dispositif d'alimentation multiple
(avec l'aimable autorisation de K-Tron).

Rappelons que, outre les gains de productivité, l'intégration du mélangeage en ligne permet d'éviter les reprises à froid de compounds, supprimant les contraintes de cisaillement et les remontées en température correspondantes, qui dégradent inutilement les polymères. En plus, la méthode facilite les achats et approvisionnements en grande quantité d'un plastique de base qui peut ensuite être formulé précisément pour chaque produit fini.

11.3.2 Adoption de matériels et méthodes de transformation économisant l'énergie

Les exemples sont nombreux avec, parmi les plus caractéristiques, le passage des presses hydrauliques aux presses électriques.

La société Rexam moulant une pièce de 52 g en polypropylène avec un moule 16 empreintes déclare réaliser une économie de 50 % en utilisant une presse « tout électrique » à la place d'une presse conventionnelle du même constructeur KraussMaffei. La répétabilité est meilleure avec un écart-type réduit de 50 % pour une des dimensions prise en référence. Enfin, les temps d'ouverture et de fermeture sont améliorés d'environ 20 %.

Sumitomo cite des gains d'énergie évoluant de 30 à 60 % par passage à une presse « tout électrique » à la place d'une presse conventionnelle suivant le type de produit à injecter et le modèle de pièce.

Dans un domaine différent, Novatec cite un gain de 25 % sur les énergies de dessiccation des résines par l'utilisation de son nouveau modèle de dessiccateur NovaWheel™.

11.3.3 Passage d'une structure compacte à une structure cellulaire

La société RPC a lancé de nouveaux gobelets jetables et des pots à yaourt fabriqués à partir d'un compound de polystyrène choc contenant un agent gonflant pour réduire leurs poids et par conséquent celui du polystyrène consommé. Le gain de poids peut atteindre 20 % sans sacrifier les performances mécaniques et le pouvoir isolant est amélioré.

Dans l'industrie automobile, Mazda Motor Corp. a développé un procédé d'injection utilisant du gaz dans un état supercritique pour produire des pièces multicouches en consommant 30 % de moins de matière plastique. En plus, les isolations thermique et phonique sont améliorées. Le démarrage industriel est prévu pour 2011.

11.3.4 Changement de procédé de fabrication

Pour les produits longs, IB Steiner, Hybrid Composites Products GmbH et Arburg, ont développé l'Exjection[®], un procédé d'injection-extrusion dans lequel la matière plastique est extrudée dans un moule mobile axialement, monté sur une presse à injecter.

Le procédé permet l'utilisation de presses sous-dimensionnées par rapport aux méthodes conventionnelles, conduisant à des réductions de 30 à 50 % des investissements, à un gain sur les coûts de transformation de 10 à 70 % et à quelques avantages techniques concernant les lignes de soudure, les orientations moléculaires et les contraintes internes résiduelles.

Dans un autre exemple, un producteur de profilés pour fenêtres déclare réduire les largeurs des profilés de 30 à 50 % en utilisant un composite hybride thermoplastique, un Twintex constitué de polyester thermoplastique renforcé fibres de verre et de polyester transformé par un procédé innovant dit *pull-extrusion*. Outre les performances mécaniques, l'isolation thermique est également améliorée par rapport à l'aluminium.

11.3.5 Re-conception du produit

BASF et Alpla, fabricant de bouteilles plastiques, ont complètement repensé la conception d'une bouteille et déclarent avoir gagné 25 % sur les coûts. Le polyester thermoplastique est remplacé par un polystyrène choc de plus faible densité permettant l'injection soufflage avec étirage de la bouteille qui a été redessinée.

ABRÉVIATIONS DES POLYMÈRES

ABS	Acrylonitrile butadiène styrène
AMC	Alkyde Moulding Compound
ASA	Acrylonitrile styrène acrylique
AU	Polyuréthane type ester
BMC	Bulk Moulding Compound
CA	Acétate de cellulose
CAB	Acétobutyrate de cellulose
CIC	Compound imprégné en continu
COC	Copolymère d'oléfines cycliques
COPE	Élastomère thermoplastique polyester
CP	Propionate de cellulose
CSM	Caoutchouc chlorosulfoné
Cy	Polycyanate
DCPD	Dicyclopentadiène
DMC	Dough Moulding Compound
E/MAA	Éthylène/Acide méthacrylique (ionomère)
EMA	Éthylène-méthacrylate
EP	Époxydes
EPDM	Caoutchouc éthylène propylène terpolymère
EPM	Caoutchouc éthylène propylène
ETFE	Éthylène polytétrafluoroéthylène
EU	Polyuréthane type éther
EVA ou E/VAC	Éthyl vinylacétate
EVA/VC	TPE chlorure de vinylidène à phase EVA réticulé
EVOH	Éthylène-alcool vinylique
FA ou FAr	Fibre aramide

FC	Fibre de carbone
FEP	Fluoroéthylènepropylène
FIT	Fibres imprégnées de thermoplastique
FSI	Fluorosilicone (abréviation non normalisée)
FV	Fibre de verre
GF	Fibre de verre
GMT	Glass Mat Thermoplastic
HMC	High Moulding Compound ou High Modulus Compound
IMC	In Mold Coating
IMP	In Mold Painting
ISR	Injection sur renfort
LCP	Polymère à cristaux liquides
MABS	Méthacrylate/ABS
MF	Mélamine
PA	Polyamide
PA6	Polyamide 6
PA Ar	Polyamide semi-aromatique
PA11 ou PA12	Polyamide 11 ou 12
PA6-12	Polyamide 6-12
PA66	Polyamide 6-6
PAI	Polyamide imide
PAMXD6	Polyarylamide
PAN	Polyacrylonitrile
PBI	Polybenzimidazole
PBT ou PBTP	Polybutylènetéréphtalate
PC	Polycarbonate
PCTFE	Polychlorotrifluoroéthylène
PE	Polyéthylène
PE-BD, HD, I, E	PE basse densité, haute densité, linéaire, expansé
PE-LD, LLD	PE basse densité, basse densité linéaire
PEBA	Élastomère thermoplastique polyéther bloc amide
PEEK	Polyétheréthercétone
PEI	Polyétherimide
PEK	Polyéthercétone
PEN	Polyéthylène naphthalate
PES	Polyéthersulfone
PESU	Polyéthersulfone
PET	Polyéthylène téréphtalate
PETP	Polyéthylène téréphtalate

PF	Phénoplaste ou résine phénol-formaldéhyde
PFA	Perfluoro-alkoxy
PI	Polyimide
PK	Polycétone
PMMA	Polyméthacrylate de méthyle
PMMA + PC	Alliage PMMA + PC
PMP	Polyméthylpentène
POM Ho, Co	Polyoxyméthylène homopolymère, copolymère
PP	Polypropylène
PPA	Polyphthalamide
PPC	Polyphthalate carbonate
PPE	Polyphénylène éther (voir aussi PPO)
PPO	Polyphénylène oxyde
PPS	Polysulfure de phénylène
PPSU	Polyphénylsulfone
PRV	Plastique renforcé verre
PS	Polystyrène
PSE	Polystyrène expansé
PSP	Polystyrylpyridine
PSU	Polysulfone
PTFE	Polytétrafluoroéthylène
PUR	Polyuréthane
PVA ou PVAL	Alcool polyvinylique
PVC	Polychlorure de vinyle rigide
PVCC ou CPVC	Polychlorure de vinyle surchloré
PVCE	Polychlorure de vinyle expansé
PVC-P	Polychlorure de vinyle souple
PVDC	Polychlorure de vinylidène
PVDF	Polyfluorure de vinylidène
RIM	Reaction Injection Moulding
RRIM	Reinforced Reaction Injection Moulding
SAN	Polystyrène acrylonitrile
SB	Styrène butadiène (PS choc)
SBS	Styrène butadiène styrène
SEBS	Styrène éthylène butylène styrène
SI	Silicone (abréviation non normalisée)
SIS	Styrène isoprène styrène
SMA	Polystyrène anhydride maléique
SMC	Sheet Moulding Compound

SPS	Polystyrène syndiotactique
SRIM	Structural Reaction Injection Moulding
SRRIM	Structural Reinforced Reaction Injection Moulding
TMC	Thick Moulding Compound
TPE	Thermoplastique élastomère
TPEE ou COPE	Élastomère polyester thermoplastique
TPE-PEBA	Élastomère thermoplastique polyéther bloc amide
TPU	Polyuréthane thermoplastique
TRE	Thermoplastique renforcé estampable
UD	Unidirectionnel
UF	Résines urée formol
UP	Polyester insaturé thermodurcissable
VE	Vinyl ester

BIBLIOGRAPHIE

Sites Internet et documentations : Association Française de Prototypage Rapide, 3D Systems, A2 Plast, Abaqueplast, Acim-Jouanin, AEC Ambition Enterprise Co., Agimel, Albis, Amut, Aoktac, Araytech, Arburg, Atem, Bassompierre Scientax, Battenfeld, Battenfeld-Gloucester, Bausano, Bekum, Berstorff, Beweplast, Billion, Boy, Brueckner, Bühler, Cannon, Capri, Charlyrobot, Chia Ming Machinery, Clextral, Collin, Colortronic, Comerio Ercole, Coperion, Corelco, Cubic Technologies, Davis-Standard, Dekuma, Demag, Demark, Desktopfactory, Desma, Dimension, DTM Corporation, Dubot Équipement-Wegener, Engel, EOS, Equiptec, Erema, Fanuc, Farpi-France, Farrel, Ferromatik Milacron, Fixopan, Flowmech, Fostoria Industries, Frimo-Huber, Geoplast, General Plastics Machines, Gericke, Graham Engineering Corporation, Greiner Extrusion, Helisys, Herbold, Höhle UV, HPB-Équipement, Husky, HW.Tech, Illig, Imvolca, Irwin Research & Development, Jomar, JSW, Kautex Maschinenbau GmbH, Kiefel, Kira, Kobelco Stewart Bolling, KraussMaffei Berstorff, Kronen, Kwaltyi Tooling & Machinery, Lancelin, Lauffer, LCM, Leistritz, Lescuyer Villeneuve, Lodige, Maillefer, Mann+Hummel Protec, Martiplast, Matrasur, Mauser AG, Mc Neil Akron Repiquet, Mecaplastic, Meico, Milacron, Mitchell, Mitsubishi, Moditec, Moretto, Motan, Multivac, Nakata-Coating, Navarini, Negri Bossi, Netstal, Nissei, Nissei ASB Machine, Objet Geometries, OEM Press Systems, Omnexus, Onapres, Package Development, Pallmann, Papenmeier, Pinette Emidecau, Piovan, PlastiVac, Polymix Equipement, PRW, Qingdao Fushun Plastic Machinery Co., Rapid, Reifenhauer, REP, Rodolfo Comerio, Rosendahl, RotoMachinery Group, Rutil,

Sacomat, Sairem, Sandretto, Santec India, SAT, Scamex, SDT Sodick PlusTech, Serta Extrusion, Sidel, SMCA, SpecialChem, Spiroflux, SPT Sodick Plustech, Starlinger, Steinl, Stopol, Stork, Stork Reed, Stratasys, Sulzer Chemtech, Sumitomo, Sumitomo Demag, Techne, Tecnova, Tincoo, Toshiba, Trexel, Tria, Tungyu-REP, Uniloy Milacron, Useon Extrusion, Vina International, Wanner, Weima, Wilmington Machinery, Windsor, Wittmann, Wuma, XMix, Yvroud, Z-Corporation, Zemat Technology Group, Zhangjiagang Weida Machinery Co., etc.

Matériaux composites, Claude Bathias et Coll., Dunod, 2009.

Thermoplastics and Thermoplastic Composites, Michel Biron, Elsevier, 2007.

Technologie de l'extrusion, Sophie Nigen, Dunod, 2006.

Injection des matières plastiques, Jean-François Pichon, Dunod, 2005.

Thermosets and Composites, Michel Biron, Elsevier, 2004.

INDEX ALPHABÉTIQUE

A

Abrasion 279
Absorption d'eau 30, 31
Adhésif non réactif 283
Adhésif réactif 283
Adhésif thermofusible 283
Agent d'expansion 252, 253
Agent gonflant 253, 254
Aide à la conduite 179, 193
Aide à la conduite des presses 109
Allégé 251, 254
Alvéolaire 251, 252, 254
Âme contreplaqué 246
Âme mousse 246
Âme nid-d'abeilles 246
Analyse de l'information 119, 181, 195
Anisotropie 14, 17, 112, 146
Application 196
Apport direct de chaleur 281
Assemblage 277

Assemblage mécanique 284
Automatisation 298

B

Back moulding 127
Bâti 205
Battage mécanique 257
Bivis 155, 158
Bivis contrarotatives 154
Bivis corotatives 152
BMC 228, 249
Bouteille 187
Brillant 116
Brillant de surface 113, 117
Broyage 58, 62
Broyeur 59, 60
Bulk Moulding Compound (BMC) 226

C

Câble 160, 169
Cadence 187
Calandrage 218, 219
Calandre 219, 220, 221

Capacité 188
Capacité d'injection 82, 83
Capacité de plastification 83, 84
Caractéristique d'unité de fermeture 96
Chalumeau 281
Chaudronnage 285
Chauffage 77, 207, 210, 211
CIM 265
Cisaillement 9
Coextrusion 155, 156
Collage 277, 282
Co-moulage 120
Compatibilité 76
Compatibilité 123, 124
Composite 225
Compression 199, 203, 204
Compression- transfert 202
Conception 10, 177, 292
Conception des moules 202
Condition de séchage 33
Confection 285

Consolidation 237
Consommation 187
Constructeur 38, 46, 57,
63, 69, 104, 108, 176,
196, 211, 215, 218,
223, 264, 275
Construction sandwich
244, 245
Contrainte 8
Corona 279
Corps creux 188
Couchage 175
Coulée 234
Coulée sous vide 260, 262
Course de fermeture 95
Coût 177
Coût de production
comparatif 22
Coût de transformation
24
Cuve 241
Cycle d'injection 76

D

Débit 145, 146
Déchet 58, 160, 173, 295
Décoration 286
Dégazage 135, 138
Dégradation 113
Dégrippage 279
Démoulage 77
Dépôt de fil en fusion 261
Dépôt de film 266, 270
Dépouille 14
Diagnostic de panne 119,
181, 195
Digitalisation laser 260
Dispersion 268
Dispositif d'alimentation
300

Dissolution de sels
minéraux 257
Dosage 38, 41, 45
Doseur 41, 42, 43, 44
Doublage 222
Dough Moulding
Compound (DMC)
226
Drapage 237, 238
Dry blends 48
Durabilité 294
Durcissement 64, 65,
231, 240
Durée de séchage 33

E

Éco-conception 291
Économie 294, 301
Économie d'énergie 294
Écoulement 11
Éjection 77
Électromagnétisme 282
e-manufacturing 259
Enduction 222, 223, 266,
267
Enroulement filamenteux
240
Éponge cellulosique 257
EPP 252
EPS 252
Estampage 248
Étirage 185
Exjection 128, 302
Expansé 160, 251
Extrudeuse 133, 134,
148, 157, 164, 174,
179
Extrudeuse biviois 151
Extrudeuse monoviois 134,
136, 147
Extrusion 133, 173

Extrusion « *coating* » 175
Extrusion de films 163
Extrusion gonflage 165
Extrusion soufflage 183
Extrusion-lamination 175

F

Fabrication directe 259
Faisceau d'électron 280
FDM 263
Fermeture 75, 206
Feuille 160, 169, 221,
238, 239
Fil 160, 170
Fil et câble 167
Filament 170
Filet 160, 170
Filière 135, 139, 161, 167
Filière plate 163, 164
Film 160, 166
Film gonflé 165
Finition 74, 271, 286
Flammage 279
Flow-coat 269
Force 210, 211
Force d'éjection 96
Force d'ouverture 96
Force de fermeture 96,
102, 190
Fréquence d'utilisation 18
Frictionnage 222
Frittage de poudre 260,
262
Frittage laser de poudres
263
Frottement 282
Fused Deposition
Modeling (FDM) 261
Fût 189

G

Gainage de fil 140
Gaz en phase
 surpercritique 256
Gelcoat 230
Gestion de l'extrusion 180
Gestion de l'injection 118
Glass Mat Thermoplastic
 (GMT) 227, 247
Gommage 222
Gonflement à la filière
 146
Grillage 160, 170

H

Humidité 32
Humidité relative 32
Hydraulique 207
Hygrométrie 30

I

IMC 127
IMM 265
Importance des séries 22
Imprégnation 266, 267,
 268
Imprégnation sous vide
 236
Impression 286
Impression 3D 260, 262,
 263
Impulsion de chaleur 281
Informatisation 109
Infusion 234, 236, 237
Injectabilité 114
Injection 75, 204
Injection assistée gaz 130
Injection assistée gaz ou
 eau 129

Injection compression
 128
Injection de poudres 265
Injection des
 thermodurcissables 212
Injection directe de gaz
 255
Injection Moulding
 Compounder (IMC)
 126
Injection simultanée 121
Injection soufflage 183
Injection successive 121,
 123
Injection-réaction 254
Insert 91
Intégration du
 mélangeage 299
Intrusion 129

L

Laser 280
Latex 268
LFRT 294
Ligne d'extrusion 159
Ligne d'extrusion de
 profilés ou de tubes 160
Ligne de calandrage 222
Ligne de soufflage 191,
 193
Liquide 73
Lit fluidisé 265
LOM 260, 261, 263
Long Fibre Reinforced
 Thermoplastics
 (LFRT) 172, 173

M

Maintien 77
Mandrin 240

Méga-presse 108
Mélangeage 38, 40, 46,
 160
Mélangeage des liquides et
 pâtes 53
Mélangeur 55
Mélangeur continu 51, 52
Mélangeur discontinu 56
Mélangeur interne 50
Mélangeur ouvert 49
Mélangeur statique 53
Métal 26
Métier à enduire 267
Micro-injection 106
Micronisation de poudre
 62
Micro-presse 107
Microsphère creuse 257
MIM 265
Miroir 281
Modélisation 298
Monovis 135, 157
Moulabilité 214
Moulage 253
Moulage à la membrane
 248
Moulage au contact 230,
 231, 234
Moulage au contact par
 projection simultanée
 232
Moulage au contact
 simple 230
Moulage au contact sous
 presse 232, 233
Moulage au sac 233
Moulage par
 centrifugation 239
Moulage par compression
 199, 201, 228

- Moulage par compression-transfert 202, 203
- Moulage par embouage 217
- Moulage par injection-réaction 235
- Moule 75, 77, 90, 91, 92, 202, 230, 237, 239, 259
- Moussage 253, 254, 255
- Mousse 160, 251, 253
- Mousse syntactique 257
- Multi-matières 120
- Mûrissement 253
- N**
- Nanocharge 293
- Norme 13
- O**
- Overbraiding* 243
- P**
- Panneau sandwich 244, 247
- Paraison 184, 194
- Part de marché 225
- Peau 246
- Peinture 266, 268
- Périphérique 209
- PIM 265
- Pistolage 269, 270
- Placement 238
- Plaque 169, 238, 239
- Plasma 280
- Plastification 76, 78, 135
- Poinçon 139
- Pollution 298
- Polypropylène expansible 252
- Polystyrène 252
- Polyuréthane 253
- Pompe à engrenage 138
- Pompe doseuse 57
- Post-cuisson 65
- Poudrage 264
- Poudrage électrostatique 265
- Poudre métallique 265
- Précision 12
- Pré-expandeur 252
- Pré-expansion 252
- Préforme 187
- Préimprégné 226, 237
- Préimprégné thermoplastique 247
- Première transformation 73, 74, 199
- Préparation de surface 279
- Préparation des résines 30
- Prepreg 226, 247
- Presse 77, 78, 100, 101, 105, 118, 203, 205, 210, 214, 232
- Presse hydraulique, électrique ou hybride 130
- Presse standard 100
- Pression d'extrusion 147
- Pression d'injection 113, 114
- Pression de maintien 115
- Prix 27, 178, 179
- Procédé 25, 227
- Production 148, 150
- Profil de vis 136, 137
- Profilé 156, 159, 177, 178
- Projection 254
- Projection simultanée 232
- Protection 286
- Prototypage rapide 259
- Prototype 259
- PSE 252
- Puissance 85, 102, 151
- Puissance de chauffe 85
- Pullwinding* 243, 244
- Pultrusion 241, 242, 243
- Pultrusion de préimprégné thermoplastique 242
- Q**
- Qualité 120
- Quantité produite 27
- R**
- Raquette chauffante 281
- Re-conception 302
- Recuit 64, 65
- Recyclage 160, 173, 174, 296
- Réduction des coûts 298
- Refroidissement 75, 77, 91, 135, 210
- Remplissage 76
- Renforcement 292
- Renfort 231
- Réparation 287, 295
- Réservoir 189, 241
- Résistance au choc 112, 117
- Réticulation 64, 65, 200, 212, 214, 231, 232, 270, 286
- Réticulation au sac 234
- Réticulation sous HF et UHF 67

Réticulation sous irradiation 67
Réticulation sous UV 66
Retrait 17, 114, 117
Reverse engineering 260
Revêtement 266, 268
RFI 236
Rhéologie 16
Rideau 269
RIFT 236
RIM 234, 254
Rotomoulage 215, 216
Roving 239
RRIM 235, 254
RTM 234
Ruban adhésif 283

S

SCRIMP 236
Séchage 30
Sécheur à air chaud 34, 35
Sécheur à air chaud déshydraté 36
Seconde transformation 73, 74, 271
Série 25
Sheet Moulding Compound (SMC) 226
Silo 241
Slush moulding 215, 217
SMC 228, 249
Solide 73, 199
Soudage 277, 280
Soudage HF 281
Soudage laser 282
Soufflage 184, 185, 190, 196
Soufflage de multicouches 185

Soufflage séquentiel 3D 193
Souffleuse 185, 187, 188
Source renouvelable 297
Spirale 114
SRIM 235
SRRIM 235
Stéréolithographie 260, 263
Stratasys 260
Stratification 230, 231, 232, 245
Stratification continue 238, 239
Stratifié 233
Stratoconception 261, 263
SuperCritical Fluid (SCF) 256
Surmoulage 120, 121, 123, 243, 260, 262
Système d'aide 118, 120
Système d'aide à la conduite 109
Système d'injection 77
Système de fermeture 90, 94, 206
Système hydraulique 207

T

Technique « in mould » 298
Température 8, 33, 110, 112, 113, 141, 145, 213
Température d'extrusion 144
Température d'injection 86
Température de fusion 141

Température de moulage et démoulage 92
Température du moule 116, 117
Température matière 109
Temps 8
Temps de cycle 190
Temps de réticulation 213
Tête 139
Tête d'équerre 140
Tête plate à filières multiples 170
Thermodurcissable 214, 227
Thermoformage 271, 272
Thermoformeuse 272, 273
Thermoplastique 227
Thermoplastique renforcé estampable (TRE) 227, 247
Thermoplastique renforcé fibres longues (LFRT) 125
Tolérance 178
Tonnelet 189
Top coat 231
Tout électrique 130
Trace de moulage 14
Traitement de surface 192
Traitement mécanique 279
Transfert 202, 203
Transformation des liquides 259
TRE 245, 246, 248, 249
Treillis 170
Trémie doseuse 48
Trempage 266
Trempe 269
Tube 159

Tubulure convolutivee 193
Tuyau 156, 159

U

Ultraviolet 280
Usinage 276
Usinage à très grande
vitesse (UTGV) 260,
262

V

VARTM 236
Vernis 268
Vis 77, 78, 83, 96, 102,
136, 150, 151
Viscosité 9, 110, 146
Vitesse d'injection 78, 84,
115, 116
Voie physique 255

Volume de production 21

Volume injectable 78

W

Wood Plastic Composites
(WPC) 155, 160, 170,
171