

Instructions de transformation

Thermoformage, Formage sous vide,

Emboutissage, Formage à chaud, Pliage

Table des matières

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Introduction | 2 |
| 2 | Matériaux | 3 |
| 2.1 | Thermoplastiques amorphes | 3 |
| 2.2 | Thermoplastiques semi-cristallins | 3 |
| 3 | Propriétés des matériaux | 5 |
| 3.1 | Fendillement sous contrainte | 5 |
| 3.2 | Propriétés thermiques | 5 |
| 3.2.1 | Chaleur spécifique | 5 |
| 3.2.2 | Conductibilité thermique | 6 |
| 3.2.3 | Capacité de transfert thermique | 6 |
| 3.2.4 | Reprise d'humidité | 7 |
| 3.2.5 | Frottement | 7 |
| 3.2.6 | Retrait | 7 |
| 4 | Thermoformage | 9 |
| 4.1 | Formage positif et formage négatif | 11 |
| 4.2 | Moules | 12 |
| 4.3 | Préchauffage | 12 |
| 4.4 | Chauffage du semi-produit | 13 |
| 4.4.1 | Chauffage par contact | 13 |
| 4.4.2 | Chauffage par convection | 13 |
| 4.4.3 | Chauffage par rayonnement | 14 |
| 4.5 | Orientation : influence de la direction d'extrusion | 15 |
| 4.6 | Calcul de l'épaisseur de paroi d'une pièce emboutie | 16 |
| 5 | Formage à chaud | 18 |
| 6 | Pliage | 20 |
| 7 | Conseil | 21 |
| 8 | Bibliographie | 22 |

1 Introduction

Divers procédés de formage se sont imposés dans l'industrie et connaissent un développement continu sur la base de l'expérience pratique. On classe ces procédés dans les catégories thermoformage, façonnage à chaud et pliage. L'emboutissage, le formage sous vide et le formage à l'air comprimé sont des procédés spéciaux de thermoformage [1].

Les thermoplastiques, qu'il s'agisse de matières premières ou de demi-produits, se prêtent particulièrement bien à ces divers procédés de formage du fait qu'ils passent en phase plastique par échauffement et peuvent alors être facilement façonnés. Après refroidissement dans le moule, la pièce conserve la forme qui lui a été attribuée à l'état chaud. Généralement, l'aire de la pièce est plus grande que celle du produit semi-fini et la pièce connaît donc une diminution de l'épaisseur de ses parois. On tient compte de ce phénomène lorsqu'on définit l'épaisseur de paroi du produit semi-fini [2].

Pour donner à la pièce sa forme définitive, il est nécessaire de travailler son contour en reprise et de lui ajouter d'éventuelles ouvertures par des moyens mécaniques. Aujourd'hui, ces opérations sont généralement exécutées par des automates à commande numérique programmés pour des géométries obtenues par CAO.

Pour certaines applications, le thermoformage se présente comme concurrent du moulage par injection ou du moulage par soufflage. L'avantage du thermoformage réside dans la possibilité d'utiliser des machines et des outillages moins onéreux, ainsi que des matériaux très divers comme la mousse ou des semi-produits préimprimés. Un autre de ses avantages est la possibilité d'utiliser des matériaux composés de plusieurs couches. Un procédé qui fait preuve depuis peu d'une diffusion renforcée sur

le marché, dit technique « Twin-Sheet », permet de fabriquer des corps creux de manière très économique.

Les critères déterminants en dernier ressort sont ceux du prix, de la quantité de pièces à fabriquer, de leur forme et de la qualité du formage.

Le choix du procédé implique de considérer les propriétés du matériau ou du semi-produit. Chaque matériau se comporte différemment en termes de température de ramollissement, de reprise élastique, de recristallisation et de dilatation thermique.

La présente Information Produit vous donne un aperçu des propriétés des semi-produits thermoplastiques, ainsi que quelques conseils de formage. Quelques aspects de la technique des machines sont également abordés.

2 Matériaux

Ce document traite des thermoplastiques non-chargés et des thermoplastiques non-renforcés. Les mélanges de thermoplastiques, qui ne s'adressent encore qu'à des applications de niche, ne seront pas abordés ici.

2.1 Thermoplastiques amorphes

Les matériaux amorphes comme le PVC-U ou le PETG, se caractérisent par une transparence élevée lorsqu'ils sont exempts d'additifs.

On les utilise en pratique en dessous de leur température de transition vitreuse T_V , domaine sur lequel ils présentent une résistance mécanique intrinsèque élevée qui permet de les travailler par des moyens mécaniques et les rend suffisamment stables pour être utilisés comme matériaux de structure.

Au-dessus de la température de transition vitreuse T_V , les propriétés mécaniques décroissent très rapidement et le matériau passe dans le domaine

caoutchouteux (voir figure 1). Après instauration du ramollissement, la résistance à la rupture σ_R et le module d'élasticité décroissent fortement, tandis que l'allongement de rupture ϵ_R croît fortement. Le domaine caoutchouteux se caractérise par une grande ductilité du matériau.

Un échauffement supplémentaire amène au domaine plastique, soit à la température de mise en œuvre T_F à laquelle le matériau peut être transformé par extrusion, injection ou compression.

A température encore plus élevée, le thermoplastique se décompose.

2.2 Thermoplastiques semi-cristallins

Les matériaux semi-cristallins, comme les PE, PP, PVDF, E-CTFE ou PFA, sont généralement opaques à translucides. En dessous de leur température de transition vitreuse T_V , ils sont extrêmement cassants et sensibles au choc (figure 2). En dessous de T_V , les plastiques semi-cristallins ne sont utilisés que dans des conditions particulières.

Entre T_V et le domaine de fusion cristalline T_C , la résistance à la rupture σ_R et le module d'élasticité décroissent légèrement, tandis que l'allongement de rupture ϵ_R croît. C'est généralement sur ce domaine que les matériaux semi-cristallins sont utilisés en pratique ou travaillés.

Au-dessus de la température de fusion cristalline T_C , les propriétés mécaniques comme la traction de rupture σ_R et le module d'élasticité décroissent fortement, tandis que l'allongement ϵ_R croît. C'est sur ce domaine de température que ces matériaux deviennent transparent du fait de la transition de phase cristalline à amorphe et où ils peuvent être facilement mis en forme.

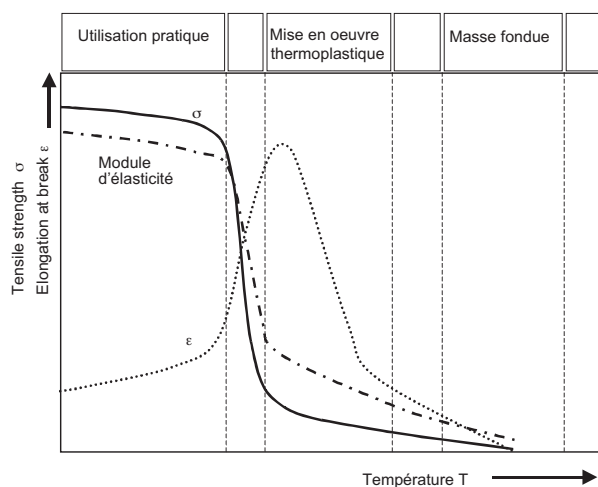


Figure 1 : Représentation schématique des propriétés mécaniques des thermoplastiques amorphes en fonction de la température (T_V = température de transition vitreuse, T_F = température de fusion, T_D = température de décomposition)

Si le formage intervient en-dessous de T_C , la pièce conserve des régions cristallines qui, bien que formables, conduisent à des contraintes résiduelles dans les parois de la pièce. En cas de nouvel échauffement, ces contraintes provoquent une déformation de la pièce [2].

Une nouvelle augmentation de température plastifie le matériau qui fond et peut être mis en forme.

La décomposition du matériau intervient bien au-delà de la température de fusion.

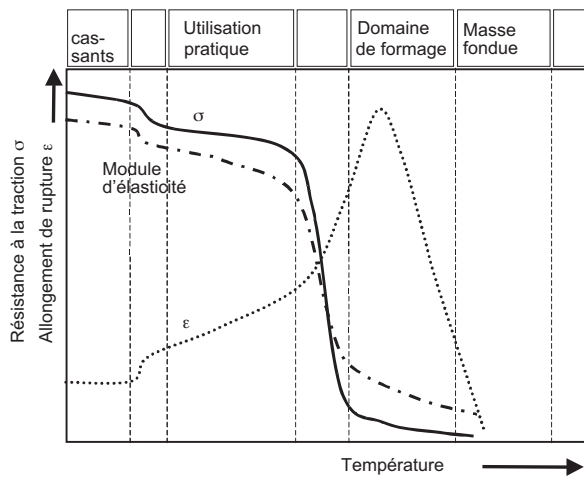


Figure 2 :
 Représentation schématique des propriétés mécaniques des thermoplastiques semi-cristallins en fonction de la température (T_V = température de transition vitreuse, T_C = température de fusion cristalline, T_D = température de décomposition)

3 Propriétés des matériaux

Diverses propriétés des thermoplastiques sont à considérer pour leur utilisation et leur mise en forme. Les propriétés thermodynamiques déterminent les procédés paramétriques et les conceptions des outils ainsi que les propriétés de la pièce.

3.1 Fendillement sous contrainte

Le fendillement sous contrainte intervient dans un thermoplastique lorsqu'il est soumis à un effort mécanique et qu'il est en contact avec certains produits chimiques comme les solvants, les huiles et les agents oxydants. L'effort mécanique peut être dû à des contraintes résiduelles si, par exemple, le matériau a été formé à froid. En utilisation, il peut aussi s'agir d'efforts extérieurs (de pression, de traction, de cisaillement). Généralement, les soudures sont aussi soumises à des contraintes résiduelles élevées.

La corrosion par fendillement sous contrainte ne peut être prévenue qu'en réduisant les contraintes (étuvage de la pièce) ou en changeant de milieu.

3.2 Propriétés thermiques

Les propriétés thermiques des thermoplastiques sont déterminantes de leur aptitude au formage et des temps de cycle qu'il est possible d'atteindre à la mise en œuvre. Les grandeurs thermiques sont d'une grande importance pour le calcul des processus de chauffage et de refroidissement.

3.2.1 Chaleur spécifique

La chaleur spécifique C_p est une grandeur thermodynamique qui désigne la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 K la température d'un matériau.

La chaleur spécifique C_p peut être déterminée à partir de la variation de l'enthalpie H (capacité calorifique) en fonction de la température T et de tables ou graphes d'enthalpie (figure 3) :

$$C_p = \frac{\Delta H}{\Delta T}$$

Une méthode expérimentale qui permet de déterminer la chaleur spécifique en fonction de la température est celle de la calorimétrie différentielle à balayage (ou DSC – Differential Scanning Calorimetry). Elle consiste à chauffer une faible quantité de matière (de 5 à 30 mg) dans un creuset et à mesurer le flux thermique nécessaire à cet effet par rapport à une éprouvette de référence.

La chaleur spécifique des thermoplastiques amorphes est comprise entre 1 et 1,5 kJ/(kg·K) et celle des thermoplastiques semi-cristallins, entre 1,5 et 2,7 kJ/(kg·K).

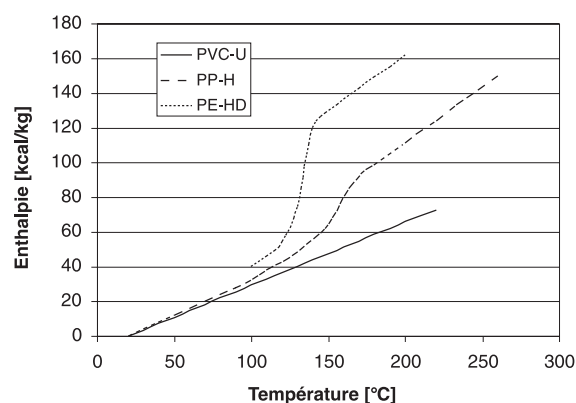


Figure 3 : Représentation graphique de l'enthalpie de quelques thermoplastiques.

3.2.2 Conductibilité thermique

La conductibilité thermique λ mesure le transport d'énergie à l'intérieur d'un matériau. Sa grandeur de mesure est la quantité de chaleur transportée en une heure sur une section de 1 m² pour une chute de température de 1 K.

La conductibilité thermique caractérise ainsi la quantité d'énergie qui peut être transportée dans un matériau par unité de temps.

La conductibilité thermique des thermoplastiques amorphes est comprise entre 0,1 et 0,3 W/(m·K) et celle des thermoplastiques semi-cristallins, entre 0,2 et 0,6 W/(m·K). Elle peut dépendre fortement de la température et doit être déterminée expérimentalement (autres valeurs en [2]).

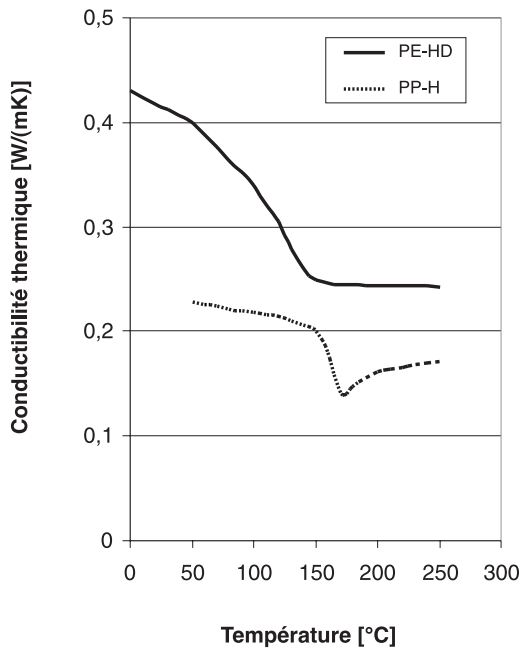


Figure 4 : Conductibilité thermique de quelques thermoplastiques en fonction de la température.

3.2.3 Capacité de transfert thermique

La troisième grandeur importante pour évaluer l'aptitude au formage d'un thermoplastique est la capacité de transfert thermique a qui est une mesure de l'évolution du transfert thermique en fonction du temps. Elle dépend de la conductibilité thermique λ , de la densité ρ et de la chaleur spécifique C_p :

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p}$$

Pour la plupart des plastiques non chargés, la capacité de transfert thermique est comprise entre 0,05 et 0,25 mm²/s. La capacité de transfert thermique détermine l'échauffement d'une plaque en thermoplastique par application d'une chaleur externe par rayonnement ou par contact direct.

En contact direct, le coefficient de transfert thermique b est encore significatif :

$$b = \sqrt{\lambda \cdot C_p \cdot \rho}$$

La connaissance de b permet de calculer la température de contact T_c entre deux corps A et B :

$$T_c = \frac{b_A \cdot T_A + b_B \cdot T_B}{b_A + b_B}$$

La température de contact T_c détermine le flux thermique entre le moule et le semi-produit pendant le processus de formage. Le tableau 1 permet de calculer les coefficients nécessaires en fonction de la température.

Tableau 1 : Coefficients de calcul du coefficient de transfert thermique

| Matériau | Coefficients de calcul du coefficient de transfert thermique b [3] : | |
|----------|--|-------|
| | a_b | b_b |
| PE-HD | 1,41 | 441,7 |
| PP-H | 0,846 | 366,8 |
| PVC-U | 0,649 | 257,8 |

3.2.4 Reprise d'humidité

En fonction du matériau, de ses modifications, des adjuvants de mise en oeuvre et des produits de renforcement, les plastiques peuvent absorber un peu d'humidité provenant de l'air ambiant ou d'un stockage en environnement humide. Toutefois, la quantité absorbée considérée est généralement si faible qu'elle est sans effet sur les propriétés de formage du semi-produit.

Par contre, dans le cas du PVC-U, du PETG et des thermoplastiques conducteurs ou colorés, cette quantité d'humidité peut être assez élevée pour former des bulles à la surface du semi-produit au moment du chauffage.

Dans le cas des plastiques renforcés ou colorés, ceci est dû aux propriétés hygroscopiques des additifs correspondants.

Pour éviter ces phénomènes indésirables, ces plastiques doivent être préalablement séchés dans une étuve (avec extraction d'air). Le tableau 2 indique les paramètres de séchage à appliquer.

Lors du séchage, il convient de veiller à disposer les plaques verticalement ou étagées pour assurer une circulation de l'air sur toutes les faces.

Tableau 2 : Paramètres de séchage des thermoplastiques ayant absorbé de l'humidité.

| Matériau | Température °C | Durée en heures par mm d'épaisseur de paroi |
|----------|----------------|---|
| PVC-U | 55 | 1,5 – 2 |
| PE-EL | 125 | 1,5 – 2 |
| PP-EL | 155 | 1,5 – 2 |
| PVDF-EL | 165 | 1,5 – 2 |
| PETG | 65 | 1,5 – 2 |

3.2.5 Frottement

Le frottement d'un matériau dépend de la morphologie de sa surface et des propriétés du matériau. Du fait de leur faible tension superficielle, le coefficient de frottement des plastiques est généralement faible à température ambiante. Toutefois, cette caractéristique change avec la température ou des modifications de surface, ainsi que dans le cas des matériaux composés de plusieurs couches. Le frottement peut jouer favorablement ou défavorablement sur le processus de formage. Un frottement élevé entre le moule et le semi-produit limite l'étirage à l'interface.

Les paramètres suivants peuvent aussi influencer sur le frottement :

- rugosité superficielle du moule,
- température,
- type de plastique.

3.2.6 Retrait

Du fait de la dilatation thermique dans les trois dimensions, les plastiques eux aussi connaissent une augmentation de leur volume spécifique (volume par kg) avec la température. Généralement, cette augmentation de volume est quasi-linéaire pour les thermoplastiques amorphes. En revanche, les thermoplastiques cristallins ont un comportement anisotrope, c'est-à-dire que leurs propriétés diffèrent selon la direction considérée. Au-dessus de la température de fusion cristalline T_C , on observe un accroissement linéaire du volume. Entre les températures T_V et T_C , l'accroissement du volume n'est plus linéaire (voir figure 5). En technique de formage, on distingue entre le retrait thermique et le retrait de moulage. Par retrait thermique, on entend la variation dimensionnelle d'un semi-produit après avoir été entreposé à une certaine température.

$$\text{Retrait thermique \%} = \frac{\text{Dimension avant essai} - \text{Dimension après essai}}{\text{Dimension avant essai}}$$

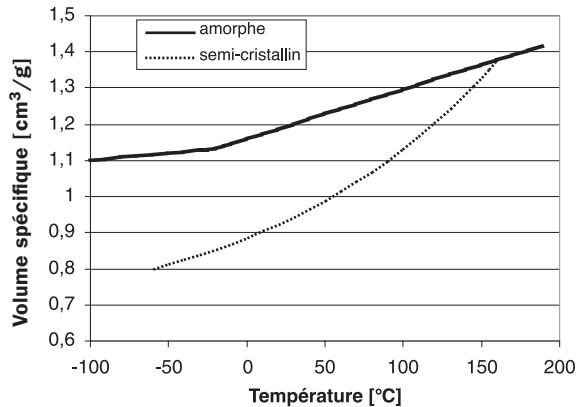


Figure 5 : Volume spécifique d'un PP amorphe et d'un PP semi-cristallin [1].

Pour déterminer le retrait thermique pendant le formage, on peut placer dans un four à air pulsé une semi-produit de dimensions connues placé sur une feuille de téflon revêtu de talc, et porter à la température de formage. Pour déterminer les anisométries, on peut mesurer la valeur du retrait dans toutes les directions, et en particulier longitudinalement et transversalement à la direction d'extrusion.

Les problèmes de formation de plis, de déchirement et de sortie du cadre ou de forte déformation pendant le chauffage par des éléments chauffants par contact

peuvent être liés au retrait thermique si la température appliquée est trop élevée.

Les valeurs exactes de retrait ne peuvent être déterminées qu'expérimentalement à l'aide de moules de thermoformage de même contour que la pièce à fabriquer. Le tableau 3 donne des valeurs indicatives pour divers thermoplastiques. On doit également considérer que les éventuels produits de charge peuvent influencer sur le retrait en général.

Le retrait de moulage est aussi un facteur à considérer dans le travail de la pièce en reprise, laquelle n'est souvent pas complètement refroidie.

D'une manière générale, les facteurs d'influence du retrait de moulage sont les suivants :

- le type de plastique (avec les éventuels écarts de charge),
- la vitesse du refroidissement : le retrait est moindre si le refroidissement est rapide,
- le retrait augmente avec la température de démoulage,
- le retrait diminue avec le taux d'étirage,
- le retrait est plus faible en formage positif qu'en formage négatif,
- le retrait diffère selon la direction d'extrusion.

Le retrait désigne la différence entre les dimensions du moule et les dimensions de la pièce refroidie. On distingue en outre le retrait de moulage, le retrait de stockage et le retrait total:

$$\text{Retrait de moulage en \%} = \frac{\text{dimension du moule} - \text{dimension de la pièce}}{\text{dimension du moule}}$$

Les dimensions du moule et celles de la pièce finie doivent être mesurées après refroidissement pendant 24 heures à 23 °C.

$$\text{Retrait de stockage en \%} = 1 - \frac{\text{dimension de la pièce après stockage (jours - semaines)}}{\text{dimension de la pièce après refroidissement (24 h)}}$$

$$\text{Retrait total} = \text{retrait de moulage} + \text{retrait de stockage}$$

4 Thermoformage

Dans le procédé de thermoformage en une seule étape, on distingue entre formage par poinçon (formage positif) et formage par matrice (formage négatif).

Le thermoformage se décompose alors en pré-étirage et en formage proprement dit, l'objectif étant d'obtenir des parois d'épaisseur homogène. Le pré-étirage peut être exécuté mécaniquement par le moule ou à l'aide d'un poinçon auxiliaire, par soufflage ou par aspiration. Le pré-étirage donne une ébauche qui présentera une répartition optimale de l'épaisseur de paroi au formage.

Le formage peut être exécuté par dépression (formage sous vide) ou par pression d'air (formage sous pression). En formage sous vide, la dépression est accompagnée par la pression atmosphérique qui applique le semi-produit contre l'empreinte. La pression maximale d'application est donc de $1 \text{ at} = 0,1 \text{ N/mm}^2$. La plaque ou la feuille est maintenue fermement dans un cadre-tendeur situé au-dessus de l'empreinte d'emboutissage (le moule). Après un chauffage et un étirage aussi homogènes que possible, l'air qui se trouve entre l'empreinte et le matériau est aspiré. La plaque est appliquée contre l'empreinte sous l'effet de la pression atmosphérique. La pièce moulée est démoulée une fois refroidie.

L'avantage du procédé sous vide est de permettre d'obtenir des pièces à parois minces et de grande surface à l'aide d'outillages simples. Le coût d'outillage et les coûts d'investissement et d'entretien sont nettement inférieurs à ceux du moulage par injection. Ce procédé permet également de fabriquer en grandes séries et de rentabiliser aussi les petites séries. Les petites pièces peuvent être produites de manière très rationalisée avec des moules à plusieurs empreintes.

S'il s'agit de reproduire avec précision la forme du moule, on utilise le procédé sous pression dans lequel le semi-produit chauffé est appliqué dans l'empreinte sous une pression élevée (de 7 à 10 bars ou de 0,7 à 1 N/mm^2).

Tous les thermoplastiques SIMONA® peuvent être thermoformés par les méthodes actuelles courantes. Les seules exceptions sont le PE-HMG 100 à haut poids moléculaire et la plaque de PVC-mousse coextrudée SIMONA, PVC-COPLAST-AS. Tous les types de machine conviennent. Pour les plaques à partir de 3 mm d'épaisseur, il est toutefois conseillé de chauffer le matériau sur les deux faces, ce qui permet de raccourcir le temps de chauffage et d'éviter d'endommager les surfaces par surchauffe. Il est également conseillé d'éviter au matériau de s'affaisser à l'aide d'un soufflage d'air d'appoint.

Pour la fabrication en grandes séries, les machines automatiques à alimentation automatique du semi-produit ont fait leurs preuves. Selon l'application, on peut utiliser des machines avec ou sans poinçon supérieur et automatisées ou non pour une dimension de découpe maximale d'environ 2 x 6 m.

Pour les thermoplastiques semi-cristallins PE, PP et PVDF un temps de chauffage de 45 sec/1mm épaisseur est nécessaire, pour PVC ca 25 sec.

Tableau 3 : Valeurs indicatives pour le thermoformage des matériaux SIMONA

déterminées expérimentalement sur une machine de thermoformage de marque Illig Type U100 à éléments chauffants en céramique, température du chauffage supérieur : 550/500/450 °C, température du chauffage inférieur : 400 °C.

| Matériau | Désignation | Taux maximal Verstreckungs- d'étirage ^{1,6} | Retrait dans la direction d'extrusion ² | | Température- de mise en œuvre ³ en °C | Température du moule en °C |
|---------------------|---|--|---|---------|---|----------------------------------|
| | | | en % | | | |
| | | | Formage positif | négatif | | |
| PE-HD/PE 80 | PE-HWU/PE-HWST PE-HWV ⁴ PE-EL | 1 : 4 1 : 5 1 : 3,5 | 2-3 | > 3 | 160-180 | 50-70 |
| PP | PP-DWU/PP-DWST/PPs PP-DW-EM | 1 : 3 1 : 2,5 | 1,5-2,5 | > 2,5 | 170-200 | 50-80 |
| PVC-U | PVC-CAW/PVC-LZ PVC-D/PVC-DS PVC-HSV/PVC-MZ ⁴ PVC-EL SIMOCEL-AS PVC-GLAS/ PVC-GLAS-SX | 1 : 4 1 : 5 1 : 2 1 : 1,5 1 : 4 | 0,5-1 | > 1 | 160-180 | < 50 |
| PETG | SIMOLUX | 1 : 4 | 0,5-1 | > 1 | 160-180 | 50-60 |
| PVDF | PVDF | 1 : 3 | 2-3 | > 3 | 190-200 | 60 |
| E-CTFE ⁵ | E-CTFE | 1 : 3 | 2-3 | > 3 | 250-260 | 80-90 |
| PVC-C | PVC-C | 1 : 2,5 | 0,5-1 | > 1 | 170-190 | 50-70 |

¹ Rapport entre la surface de la plaque et la surface de la pièce finie.

² Env. la moitié de cette valeur dans la direction transversale.

³ Température de la surface et non celle de l'élément chauffant.

⁴ Pour taux d'étirage très élevés, spécial pour formage négatif.

⁵ Entre 170 et 240 °C, l'E-CTFE présente un très faible allongement de rupture et ne doit pas être utilisé dans cette plage de température.

⁶ Selon le matériel et l'opérateur.

4.1 Formage positif et formage négatif

Le choix entre le formage positif et le formage négatif est dicté par le résultat que l'on souhaite obtenir au niveau de la pièce finie. Par exemple, la précision de formage en formage positif est obtenue au niveau de la face interne de la pièce, car c'est cette face du semi-produit qui est appliquée contre l'empreinte de moulage. En outre, la surface de l'empreinte sera très bien reproduite sur la face de la pièce qui est appliquée contre elle.

La répartition de l'épaisseur de paroi est également très différente. Là où l'on obtiendra une zone à paroi mince en formage positif, on obtiendra une zone à paroi épaisse en formage négatif.

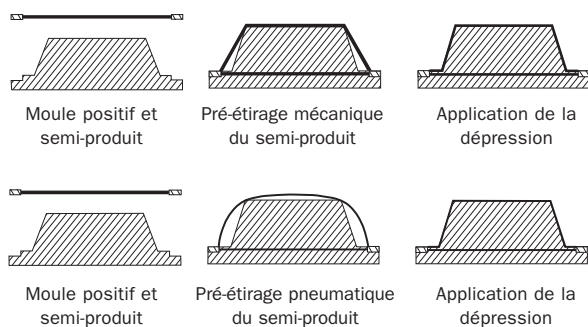


Figure 6 : Représentations schématiques du formage positif

Les motifs du moule et les caractéristiques de fabrication sont très bien reproduites au niveau de la pièce, au mieux avec le PP. Le respect de tolérances étroites exige d'avoir recours au formage positif car la pièce se rétracte sur le moule pendant le refroidissement. De ce fait, le retrait thermique est limité.

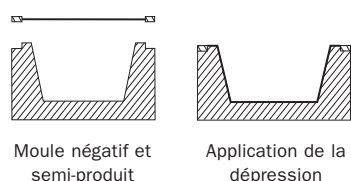


Figure 7a : Représentation schématique du formage négatif sans pré-étirage mécanique ou pneumatique

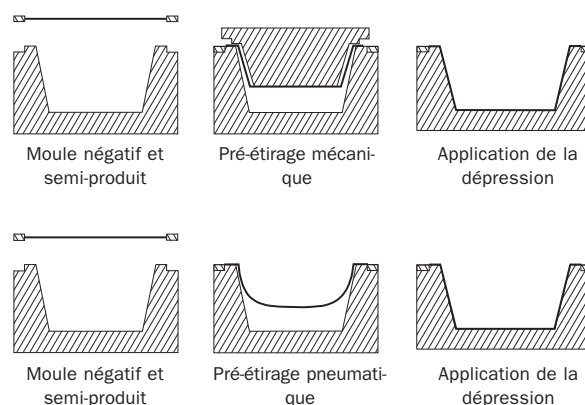


Figure 7b : Représentation schématique du formage négatif avec pré-étirage mécanique ou pneumatique

Lorsque le matériau est complètement plastifié, le pré-étirage doit être appliqué à une hauteur adéquate en fonction de la forme du moule (pour éviter la formation de plis). Ce pré-étirage doit intervenir à environ $\frac{2}{3}$ de la hauteur du moule. On abaisse ensuite le moule sur la plaque en pré-tension et on applique la dépression. Le refroidissement rapide limite la déformation aux endroits où le plastique est en contact avec le moule.

La phase de refroidissement suivante est de préférence assurée par de l'air. On n'utilisera l'aspersion d'eau que lorsque les surfaces se seront suffisamment refroidies pour éviter de fixer des contraintes dans la pièce. Cette méthode permet d'obtenir une épaisseur de paroi régulière et de réduire les contraintes résiduelles.

Pour pouvoir fabriquer de manière économique des pièces impeccables thermoformées en polyéthylène, en PVDF ou en polypropylène, il est impératif – après leur démoulage encore chaudes – de les refroidir complètement dans des châssis séparés pour éviter le gauchissement. Il est conseillé d'utiliser des châssis de refroidissement dont la géométrie correspond à celle du moule. On peut à cet effet utiliser des anciens moules en bois.

Une température de moulage élevée, un refroidissement lent et une température de démoulage la plus faible possible, ainsi qu'une découpe des lisières directement en sortie de thermoformage, contribuent à réduire le gauchissement.

4.2 Moules

Les matériaux utilisés pour la fabrication des moules sont principalement le bois, l'aluminium, la résine et les stratifiés. Le choix du matériau du moule est déterminé par :

- la qualité souhaitée des pièces finies (p. ex. la qualité de surface),
- le nombre de pièces,
- l'usinabilité,
- la conductibilité thermique,
- la résistance à l'usure,
- le coût.

La construction du moule doit tenir compte du coefficient de retrait du thermoplastique et de la direction d'extrusion des plaques.

La thermorégulation des moules permet d'obtenir des séries régulières et des cadences rapides.

Le décapage au sable des surfaces présente l'avantage de permettre d'aspirer complètement l'air en formage sous vide et d'éviter l'air occlus. Les alésages d'aspiration ne doivent pas dépasser 1 mm – et être inférieurs à 0,8 mm avec les polyoléfines – pour éviter d'être trop nettement reproduits par le matériau plastifié. Il est conseillé de revêtir les moules d'un agent démoulant (talc, téflon projeté, cire, savon). Généralement, la possibilité de pré-étirer

la plaque chauffée en formage positif permet d'obtenir une épaisseur de paroi un peu plus régulière.

Les arêtes peuvent être relativement vives avec le polypropylène et le PET-G. Le rayon minimal pour une température de formage donnée est à peu près égal à l'épaisseur de la plaque. Avec le PE-HD, le PVC et le PVDF, nous recommandons d'utiliser un rayon d'arête plus grand (de 2 à 3 fois l'épaisseur de la plaque).

Les plastiques semi-cristallins (PE, PP, PVDF, E-CTFE) exigent une conicité de 5 à 10°, les thermoplastiques amorphes (PVC, PET-G), une conicité de 5° environ. Cette condition ne s'applique pas aux moules négatifs du fait que la pièce se décolle du moule au refroidissement.

4.3 Préchauffage

Afin de réduire l'occupation des machines, nous conseillons de préchauffer les plaques dans un four à air pulsé jusqu'à une température juste inférieure au point de ramollissement (PE-HD 110 °C, PP 125 °C, PVC 50 à 55 °C, PVC-C 70 à 80 °C, PET-G 60 à 70 °C, PVDF 140 °C, E-CTFE 140 °C), à faible puissance de chauffage afin de préserver au maximum la surface des plaques. Cette méthode se traduit par une plus grande durabilité des pièces finies. Il est impératif que la plastification atteigne les lisières si l'on veut éviter un gauchissement trop important. Nous recommandons fortement de protéger la machine de thermoformage contre les courants d'air sur tous ses côtés.

4.4 Chauffage du semi-produit

Le chauffage du semi-produit est l'une des étapes les plus importantes du procédé de thermoformage. Le semi-produit à thermoformer doit pouvoir être chauffé de manière économique, c'est-à-dire atteindre sa température de formage rapidement et moyennant peu d'énergie. D'une manière générale, on veillera à le chauffer uniformément. Des différences de température dans le semi-produit ne sont avantageuses pour le thermoformage que dans certains cas particuliers.

La fenêtre de mise en œuvre constituée par la température de formage inférieure et la température de formage supérieure est à considérer. Elle dépend du matériau et est indiquée dans le tableau 3. Le chauffage doit être piloté de manière à maintenir la température dans cette fenêtre de mise en œuvre. Pratiquement, il est impossible d'éviter l'apparition d'un gradient de température dans l'épaisseur de paroi. Il convient cependant de veiller avec soin que le cœur du semi-produit dépasse le seuil de température bas si l'on veut éviter des contraintes dans la pièce. Par exemple, des éléments chauffants très chauds, chaufferont la surface du semi-produit trop fortement et trop vite et une décomposition ou des modifications de propriétés pourront intervenir dès ce stade. Du fait d'une faible conductivité thermique, la température au cœur du semi-produit ne pourra pas suivre celle de la surface et le cœur sera trop froid pour permettre un formage satisfaisant. Ces conditions se traduiront par la formation de contraintes résiduelle qui, sous une sollicitation excessive de la surface de la pièce, nuiront à sa durabilité.

Le moment de la distribution optimale de la température dans le semi-produit dépend en premier lieu de ses propriétés thermodynamiques et de la méthode de chauffage utilisée.

En tout état de cause, le calcul précis des paramètres de chauffage est très complexe et demande d'importants moyens car il suppose de déterminer toutes les propriétés thermodynamiques du semi-produit, du moule et du système de chauffage.

En pratique, il est préférable de les déterminer expérimentalement pour chaque semi-produit et pour chaque moule. A cet effet, un thermomètre sans contact (thermomètre IR) ou des bandes thermométriques seront très utiles pour déterminer le profil de la température de surface. Ces outils permettront également de déterminer le profil de températures des éléments chauffants.

4.4.1 Chauffage par contact

En chauffage par contact, la plaque à thermoformer est placée sur une plaque chauffante moyennant l'utilisation d'un film de séparation (film téflon) et d'un support pour améliorer le contact – ou entre deux plaques chauffantes chacune avec un film de séparation – et laissée ainsi jusqu'à ce que la plaque à thermoformer ait atteint la température de surface des plaques chauffantes. L'échauffement se produit par simple conduction de la chaleur dans la plaque. En pratique, il convient de veiller à l'homogénéité de la température des plaques chauffantes pour éviter des pointes qui risqueraient de trop solliciter le semi-produit.

4.4.2 Chauffage par convection

Le chauffage par convection consiste ici à chauffer le semi-produit dans un four à air pulsé réglé à la température de formage. On utilise cette méthode notamment pour chauffer les plaques de PETG épaisses avant de les emboutir.

4.4.3 Chauffage par rayonnement

Le chauffage par rayonnement consiste à créer une interaction entre une source de rayonnement électromagnétique et une surface qui absorbe le rayonnement sous forme de chaleur. Le rayonnement est caractérisé par sa longueur d'onde. Les plastiques absorbent les rayonnements surtout dans les infrarouges (plage IR) de 0,8 à 10 μm de longueur d'onde.

L'absorption dépend de l'épaisseur et de la couleur du plastique, ainsi que de la longueur d'onde de la source de rayonnement. Lorsque la surface a presque absorbé la totalité de l'énergie de rayonnement, aucun échauffement du cœur de la plaque ne se produit plus pour la plage de longueur d'onde considérée. Si la longueur d'onde est comprise entre 1 et 1,4 μm , le rayonnement pénètre sur plusieurs mm. Au-delà de 2,5 μm , c'est surtout la surface qui s'échauffe et l'échauffement d'une plaque épaisse peut nécessiter un très long délai du fait de la mauvaise conductibilité thermique.

Dans la pratique, on ne trouve pas de source de rayonnement monomodale, c'est-à-dire qui n'émettrait qu'une seule longueur d'onde. Les sources du commerce émettent sur toute la plage IR et leur longueur d'onde de rayonnement maximal diffère selon leur type (figure 8).

On voit ici nettement que la source à céramique possède un spectre de longueur d'onde très large qui recouvre ainsi un domaine qui correspond à celui du pouvoir photo-absorbant de la plupart des plastiques.

Par contre, la source à incandescence présente un maximum de rayonnement très marqué qui correspond à un domaine d'émission d'énergie principal compris entre 0,5 et 2 μm . C'est justement le domaine sur lequel la profondeur de pénétration est très élevée et

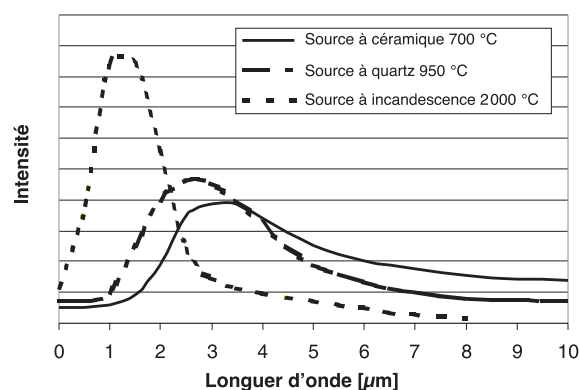


Figure 8: Caractéristiques de rayonnement de divers sources IR du commerce

l'absorption est minimale. De ce fait, l'échauffement à cœur se produit non seulement par conduction de la chaleur de surface, mais aussi directement par pénétration du rayonnement.

Lorsque la température du rayonnement augmente, le rayonnement maximal se déplace vers les longueurs d'onde plus courtes. L'énergie à apporter au semi-produit dépend également de la température de la source, laquelle peut permettre une réduction importante des temps de cycle.

Les sources de rayonnement récentes, avec un rayonnement maximal de l'ordre de 1 μm (sources halogènes), devraient permettre d'échauffer encore plus vite [4]. Le transfert thermique est toutefois physiquement limité par la caractéristique d'absorption du plastique. Les sources à incandescence ne peuvent donc pas toujours être utilisées car elles échauffent trop fortement la surface et la température du cœur de la plaque ne peut pas suivre. La surface du semi-produit risque donc être endommagée, nuisant à la durabilité et à la stabilité de la couleur, en particulier en exposition aux intempéries.

4.5 Orientation : influence de la direction d'extrusion

L'essai de rétraction permet de déterminer l'orientation ou l'étirement des macromolécules d'un semi-produit. Une orientation marquée, comme c'est généralement le cas dans la direction d'extrusion, favorise considérablement la formation de plis. Dans cette direction, le retrait d'une plaque est généralement nettement plus important que dans la direction transversale. Avec les moules à plusieurs empreintes équidistantes ou avec les moules à segments répétitifs dont la longueur est supérieure à la largeur (figure 9), la direction d'extrusion doit être parallèle à la longueur des segments pour éviter le plissage. Ceci est d'autant plus important en cas de striction dans la direction transversale à l'extrusion.

Règle empirique : direction longitudinale de la plaque = orientation longitudinale de la pièce thermoformée.
Pour les applications spéciales, nous conseillons d'utiliser du PVC-T ou du PVC-TF.

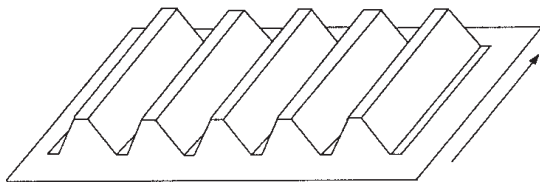


Figure 9 : Pour les pièces à forte orientation, le semi-produit doit être extrudé dans la direction longitudinale des segments du moule.

4.6 Calcul de l'épaisseur de paroi d'une pièce emboutie

Le taux d'étirage se définit comme le quotient de l'aire de la plaque de base (S1) par l'aire de la pièce emboutie (S2).

Deux exemples de calcul sont donnés ci-après en considérant que l'épaisseur de paroi est la plus régulière possible :

Cuve cylindrique

Soit:

Châssis de thermoformage avec masque

Cylindre

Epaisseur de paroi souhaitée

$$D_1 = 48 \text{ cm}$$

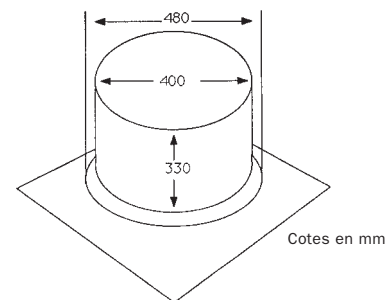
$$D_2 = 40 \text{ cm}, \quad h = 33 \text{ cm}$$

$$s_1 = 3 \text{ mm}$$

Déterminer:

Epaisseur de paroi initiale

$$s_2 = x \text{ mm}$$



Solution:

S_1 (aire de la plaque de base)

$$= r^2 \cdot \pi = 24 \cdot 24 \cdot \pi = 1,809 \text{ cm}^2$$

Cylindre M

$$= D_2 \cdot \pi \cdot h = 40 \cdot \pi \cdot 33 = 4,147 \text{ cm}^2$$

S_2 (aire de la pièce emboutie)

$$= S_1 + \text{cylindre} = 5,956 \text{ cm}^2$$

Taux d'étirage $e_1 : e_2 \approx S_1 : S_2 \approx 1 : 3.3$

D'où:

pour obtenir une pièce finie de 3 mm d'épaisseur de paroi, il faut partir d'une plaque d'au moins 10 mm d'épaisseur.

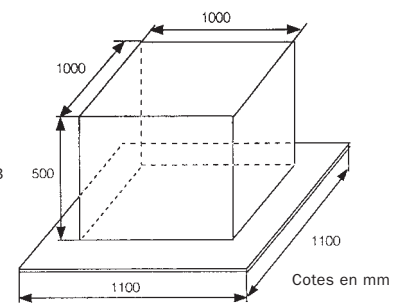
Cuve rectangulaire

Soit:

Châssis de thermoformage avec masque = $1,1 \cdot 1,1 \text{ m}^2$
Cuve rectangulaire = $1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,5 \text{ m}^3$
Epaisseur de paroi initiale e_2 = 5 mm

Déterminer:

Epaisseur de paroi souhaité e_1 = x mm



Solution:

S_1 (aire de la plaque de base) = $1,1 \cdot 1,1 \text{ m}^2$ = $1,21 \text{ cm}^2$
 M (aire du conteneur) = $4 \cdot 1,0 \cdot 0,5 \text{ m}^2$ = $2,00 \text{ cm}^2$
 S_2 (aire de la pièce emboutie) = $S_1 + M$ = $3,21 \text{ cm}^2$

Taux d'étirage $e_1 : e_2 \approx S_1 : S_2 \approx 1 : 2,5$

D'où:

L'épaisseur de la pièce finie ne montrera plus d'environ max. 2 mm (mieux vaut compter sur 1,5 mm)

5 Formage à chaud

Contrairement au thermoformage dans lequel le matériau est encastré et chauffé par une source à haute température sur une ou les deux faces, le formage à chaud fait appel à un chauffage en four à air pulsé nettement moins violent.

Ici, le semi-produit thermoplastique est également chauffé jusqu'à son domaine élastique de manière à maintenir à un faible niveau les efforts de formage et les contraintes résiduelles dans la pièce finie (chap. 2).

Pour le formage, le semi-produit découpé et chauffé est placé autour du moule et maintenu par dépression ou mécaniquement sur ou dans l'empreinte de moulage jusqu'à ce qu'il soit suffisamment refroidi pour être assez rigide.

Pour assurer le respect des cotes de la pièce, des essais préliminaires sont nécessaires à l'aide du moule de production ou d'un outillage de forme comparable. En outre, la température de formage doit être déterminée expérimentalement car les propriétés mécaniques finales peuvent être différentes selon la température. L'exemple du PVC-U (figure 10) l'illustre clairement. L'allongement de rupture présentant un minimum à 135 °C, il est préférable de former hors de ce domaine.

Pour le formage à chaud, SIMONA AG propose des semi-produits comme le PE-HWV qui, du fait des conditions particulières de sa fabrication, présente des valeurs de retrait favorables pour ce procédé.

Le format de découpe de la plaque doit tenir compte des valeurs de retrait. Il est également conseillé de prendre une petite marge de longueur en vue de la nécessaire finition en reprise.

La meilleure méthode pour chauffer la découpe de plaque est d'utiliser un four à air pulsé à bonnes caractéristiques de réglage. Pour permettre un échauffement sur tous les côtés, les plaques thermoplastiques seront posées sur des soles étagées.

Les valeurs indicatives de la température de chauffage des plaques à former sont les suivantes :

- PE-HD 125 à 150 °C
- PP-H 160 à 170 °C
- PVC-U 110 à 140 °C
- PETG 140 à 170 °C
- PVDF 175 à 200 °C
- E-CTFE 160 à 170 °C

Pour augmenter les cadences, il est possible de travailler à des températures plus élevées à condition de pouvoir observer les surfaces et mesurer la température de surface.

La durée de chauffage dépend de la température du four, de la dynamique de l'air dans le four, de l'épaisseur de paroi des plaques à chauffer et, bien sûr, du type de plastique. Les valeurs indicatives suivantes ont fait leurs preuves en atelier :

| | |
|------------------------|--------------------------------------|
| Polyoléfines et PVDF : | durée de chauffage en mn : |
| | 6 fois l'épaisseur de la plaque (mm) |
| PVC : | durée de chauffage en mn : |
| | 3 fois l'épaisseur de la plaque (mm) |
| PETG : | durée de chauffage en mn : |
| | 3 fois l'épaisseur de la plaque (mm) |

On veillera (par contrôle visuel) à chauffer les plaques de manière uniforme et sur tous les côtés, afin de réduire le risque de reprise de forme après formage et refroidissement.

Le matériau du moule sera choisi en fonction de la durabilité souhaitée et des sollicitations prévues pour la pièce, ainsi que de sa qualité de surface. Le moule peut être réalisé en plâtre, en résine, en bois, en plastique ou en métal. Pour les moules en plâtre, on veillera à une humidité résiduelle minimale pour éviter un refroidissement brusque sur le moule.

En général, on travaille avec un moule en deux parties (poinçon et matrice). Dans certains cas, on peut remplacer un des semi-moules par un linge, la découpe chauffée étant enroulée sur un noyau et maintenue jusqu'à refroidissement.

6 Pliage

Il existe plusieurs méthodes pour chauffer la zone linéaire de pliage d'une plaque, d'un seul côté ou des deux :

1. sans contact

- par une source de rayonnement (source infrarouge ou à quartz),
- par filament incandescent ou par cartouche chauffante,
- par soufflage d'air chaud,

2. avec contact

- par des éléments chauffants plans.

Lorsque la plaque en matière plastique est suffisamment chaude, on la plie selon l'angle souhaité et on la maintient en position jusqu'à resolidification du matériau. Un soufflage d'air comprimé accélère le refroidissement.

On peut considérer que le rayon minimal de pliage est égal au double de l'épaisseur de la plaque.

7 Conseil

Nos techniciens d'application jouissent de nombreuses années d'expérience de l'utilisation et de la mise en oeuvre de nos semi-produits thermoplastiques.

C'est avec plaisir que nous vous conseilleront.

e-mail : tsc@simona.de

8 Bibliographie

- [1] James L. Throne, Joachim Beine: « Thermoformen », Hanser Verlag Munich Vienna 1999
- [2] Adolf Illig: « Thermoformen in der Praxis », Hanser Verlag Munich Vienna 1997
- [3] Georg Menges: « Werkstoffkunde Kunststoffe », Hanser Verlag Munich Vienna 1990
- [4] W. Daum: « Halogenstrahler verbessern das Warmformen », Kunststoffe 84 (1994), Vol. 10, P. 1433–1436

SIMONA dans le monde entier

SIMONA AG

Teichweg 16

D-55606 Kirn

Phone +49 (0) 67 52 14-0

Fax +49 (0) 67 52 14-211

mail@simona.de

www.simona.de

Usine I/II

Teichweg 16

D-55606 Kirn

Phone +49 (0) 67 52 14-0

Fax +49 (0) 67 52 14-211

Usine III

Gewerbestraße 1-2

D-77975 Ringsheim

Phone +49 (0) 78 22 436-0

Fax +49 (0) 78 22 436-124

Usine V

Würdinghauser Str. 53

D-57399 Kirchhundem

Phone +49 (0) 27 23 772-0

Fax +49 (0) 27 23 772-266

SIMONA S.A. Paris

Z.I. 1, rue du Plant Loger

F-95335 Domont Cedex

Phone +33 (0) 1 39 35 49 49

Fax +33 (0) 1 39 91 05 58

domont@simona-fr.com

SIMONA S.A. Lyon

Z.I. du Chanay

2, rue Marius Berliet

F-69720 Saint-Bonnet-de-Mure

Phone +33 (0) 4 78 40 70 71

Fax +33 (0) 4 78 40 83 21

lyon@simona-fr.com

SIMONA S.A. Angers

Z.I. 20, Bld. de l'Industrie

F-49000 Ecouflant

Phone +33 (0) 2 41 37 07 37

Fax +33 (0) 2 41 60 80 12

angers@simona-fr.com

SIMONA UK LIMITED

Telford Drive

Brookmead Industrial Park

GB-Stafford ST16 3ST

Phone +44 (0) 1785 22 24 44

Fax +44 (0) 1785 22 20 80

mail@simona-uk.com

SIMONA AG SCHWEIZ

Industriezone

Bäumlimattstrasse

CH-4313 Möhlin

Phone +41 (0) 61 8 55 90 70

Fax +41 (0) 61 8 55 90 75

mail@simona-ch.com

SIMONA S.r.l. ITALIA

Via Padana

Superiore 19/B

I-20090 Vimodrone (MI)

Phone +39 02 25 08 51

Fax +39 02 25 08 520

mail@simona-it.com

SIMONA IBERICA

SEMIELABORADOS S.L.

Doctor Josep Castells, 26-30

Polígono Industrial Fonollar

E-08830 Sant Boi de Llobregat

Phone +34 93 635 41 03

Fax +34 93 630 88 90

mail@simona-es.com

SIMONA-PLASTICS CZ, s.r.o.

Zděbradská ul. 70

CZ-25101 Říčany-Jažlovice

Phone +420 323 63 78 3-7/-8/-9

Fax +420 323 63 78 48

mail@simona-plastics.cz

www.simona-plastics.cz

SIMONA POLSKA Sp. z o.o.

ul. H. Kamieńskiego 201-219

PL-51-126 Wrocław

Phone +48 (0) 71 3 52 80 20

Fax +48 (0) 71 3 52 81 40

mail@simona.pl

www.simona.pl

SIMONA FAR EAST

LIMITED

Room 501, 5/F

CCT Telecom Building

11 Wo Shing Street

Fo Tan

Hongkong

Phone +852 29 47 01 93

Fax +852 29 47 01 98

sales@simona.com.hk

SIMONA AMERICA Inc.

64 N. Conahan Drive

Hazleton, PA 18201

USA

Phone +1 866 501 2992

Fax +1 800 522 4857

mail@simona-america.com

www.simona-america.com