

Jean-François Agassant
Pierre Avenas
Jean-Philippe Sergent
Bruno Vergnes
Michel Vincent

Mise en forme

4^e édition

des **polymères**

Approche thermomécanique de la plasturgie

Mise en forme des polymères

Approche thermomécanique de la plasturgie

4^e édition

Jean-François Agassant

Pierre Avenas

Jean-Philippe Sergent

Bruno Vergnes

Michel Vincent



www.editions.lavoisier.fr

Préface

L'industrie des polymères et des matières plastiques est en forte croissance depuis les années 1960. Ces matériaux sont de plus en plus présents et améliorent notre vie quotidienne, souvent même sans que l'on en soit conscient : vêtements, dispositifs électroniques, articles de sport, implants chirurgicaux, emballages et contenants, matériaux de construction, pièces d'automobiles, d'avions, etc. Par exemple, peu de gens réalisent que 50 % du volume des voitures actuelles est composé de matériaux plastiques et composites polymères, mais ceci représente uniquement 10 % de leur poids. Notons que l'industrie des matières plastiques et des composites est constituée en grande partie de petites et moyennes entreprises (PME). Ce secteur représente des millions d'emplois et un fort pourcentage du produit intérieur brut (PIB) des pays industrialisés.

La mise en forme des matières plastiques, ou plasturgie, est l'activité manufacturière qui consiste à convertir les matériaux polymères de base en produits finis de forme et de propriétés désirées. C'est un domaine relativement nouveau des sciences appliquées qui veut répondre, en particulier, aux besoins de la recherche et de la formation de la main d'œuvre des PME du secteur. L'ingénieur ou le scientifique du domaine doit concevoir des outillages et des produits qui répondent à des spécifications strictes tout en minimisant les coûts de production. L'enseignement de la mise en forme des matières plastiques est rendu difficile par l'ensemble des notions complexes auxquelles il doit faire appel : la mécanique des milieux continus, le comportement non newtonien, la viscoélasticité ainsi que les phénomènes de transfert de chaleur, de matière et de quantité de mouvement. S'il existe plusieurs ouvrages de grande qualité sur les propriétés des polymères et leur préparation, on en retrouve très peu consacrés aux principes de la mise en forme des polymères et des matières plastiques, même en langue anglaise. Cet ouvrage est la quatrième édition, revue et augmentée par rapport aux précédentes. Il s'adresse aux étudiants, ingénieurs, scientifiques et chercheurs qui veulent appréhender les procédés de mise en forme pour, éventuellement, en optimiser les conditions d'opération et concevoir de nouveaux produits. Dès la première édition en 1982, j'avais été impressionné par la grande valeur pédagogique de cet ouvrage et par le souci des auteurs à couvrir les connaissances fondamentales du domaine et à présenter des solutions approchées pour plusieurs problèmes-clés, avec calculs des ordres de grandeur. On y trouvait également

de nombreux exercices et corrigés. Ces observations m'avaient amené, avec les auteurs, à adapter et traduire la deuxième édition en anglais, publiée par Hanser en 1991 sous le titre *Polymer processing : principles and applications*. Ce livre a connu un vif succès en Amérique du Nord.

Cet ouvrage fait appel à l'expérience considérable accumulée par les auteurs au travers de la direction de nombreux travaux de thèse en étroite collaboration avec des industriels. Mentionnons le caractère exhaustif de cet ouvrage où tous les procédés classiques de mise en forme sont analysés, à l'exception du rotomoulage. Plusieurs notions complémentaires sont présentées en annexes, évitant ainsi d'alourdir la présentation des notions principales. On y retrouve plusieurs problèmes d'intérêt pour la mise en forme, avec des solutions approchées. Les simplifications classiques et approximations de la lubrification hydrodynamique et de Hele-Shaw y sont traitées en détail. Par ailleurs, les auteurs font appel, lorsque nécessaire, aux solutions numériques qui permettent, entre autres, de justifier ou non les approximations. L'ouvrage est composé de dix chapitres : rappel des notions de la mécanique des milieux continus, principales notions du comportement rhéologique des polymères avec applications principales en rhéométrie, chaleur et transfert thermique, méthodes d'approximations et de calcul, extrusion monovis et écoulements en filière, extrusion biviois et applications, moulage par injection, calandrage, procédés comportant un étirage et instabilités d'écoulement.

En résumé, il s'agit d'un ouvrage unique, à la fois par son approche pédagogique et son caractère exhaustif, qui en font pour tous les plasturgistes un outil précieux de compréhension et de conception des procédés.

Pierre J. Carreau

Professeur émérite,
Département de génie chimique
École Polytechnique de Montréal, Canada

Préface à la précédente édition

Les propriétés viscoélastiques des molécules en longue chaîne sont tout à fait extraordinaires. Même en solution très diluée (100 parties par million), le polyoxyéthylène réduit de façon importante les pertes turbulentes de l'eau. Il permet aussi de faire fonctionner des « siphons sans tube » – découverts par James à Toronto – qui sont des objets étonnants. Même chose pour les polymères fondus : en mouvement très lent, ils coulent comme des liquides. En mouvement un peu plus rapide, ils se comportent comme des caoutchoucs. Et dans les écoulements de paroi, ils ont parfois des propriétés étonnantes de glissement – que nous commençons à sonder au Collège de France par des méthodes optiques assez sophistiquées. Tout ce que je viens de décrire – hâtivement – a des conséquences pratiques majeures. Et en particulier pour l'élaboration des matières plastiques. Qu'il s'agisse de moulage, d'extrusion ou de procédés plus complexes, il est constamment nécessaire de forcer un fluide polymère à s'adapter vite à des formes prescrites – ce qu'il n'aime pas faire. D'où des défauts nombreux dans le produit final, comme cette « peau de requin » qui est un désastre pour le fabricant de produits extrudés. L'ingénierie des plastiques est donc un art difficile. Les auteurs qui le décrivent ici ont accumulé là-dessus une expérience considérable, en travaillant directement avec de nombreux industriels. Leur approche est surtout fondée sur la mécanique, mais ils ont incorporé dans leurs premiers chapitres (et à quelques autres endroits) une introduction utile aux phénomènes physiques sous-jacents. Bien sûr, cette introduction ne saurait se substituer aux ouvrages de base comme celui de John Ferry pour la viscoélasticité, ou celui de S. Edwards et M. Doi sur le comportement de chaînes enchevêtrées. La première version du présent livre a déjà bien fait ses preuves : les milieux du génie chimique en France et au Canada y font largement appel. Cette nouvelle version, nettement plus étoffée, devrait rendre de grands services : je lui souhaite un très bon succès.

Pierre-Gilles de Gennes

Décembre 1995

Présentation et remerciements

Les auteurs de cet ouvrage appartiennent – ou ont appartenu – au Centre de mise en forme des matériaux (CEMEF) de l'École des Mines de Paris (aujourd'hui MINES ParisTech).

Ce centre de recherche a été créé en 1974. Il a été l'un des premiers établissements à s'implanter sur le site de Sophia-Antipolis (Alpes-Maritimes) en 1976. Il est associé au Centre national de la recherche scientifique (CNRS) depuis 1979 (Unité mixte de recherche 7635). Il compte aujourd'hui près de 160 personnes : enseignants-chercheurs, chercheurs, étudiants en thèse et en mastère spécialisé, ingénieurs, techniciens et administratifs.

Le rôle du CEMEF est double :

– contribution à la formation, dans le domaine des matériaux et de leur mise en forme, des ingénieurs civils des Mines de Paris et formation par la recherche d'étudiants en master, en thèse, en mastère spécialisé ou post-doctorants. Depuis l'origine du laboratoire, près de 450 diplômes de doctorat et plus de 350 diplômes de mastère spécialisé ont été soutenus. Ces diplômés travaillent aujourd'hui dans de nombreux secteurs industriels avec lesquels le laboratoire est en relation ;

– contribution à la résolution de problèmes scientifiques et techniques, dans le domaine de la transformation et de la mise en forme des matériaux (et plus particulièrement des métaux et des polymères). Le laboratoire entretient des relations avec les principales entreprises françaises et européennes dans le domaine de l'élaboration, de la mise en œuvre et de l'utilisation des matériaux.

Jean-François Agassant est ingénieur civil des Mines (Paris), docteur es sciences, professeur à l'École des Mines de Paris. Il a été directeur adjoint du CEMEF (1981-2007) et directeur de l'unité mixte entre l'École des Mines de Paris et le CNRS (1989-2000). Il est aujourd'hui responsable du département « Mécanique et Matériaux » et délégué de l'École sur le site de Sophia-Antipolis.

Pierre Avenas est ancien élève de l'École Polytechnique et ingénieur du corps des Mines. Il a lancé les recherches sur les polymères à l'École des Mines de Paris et contribué à la création du CEMEF, dont il a été directeur de 1974 à fin 1978. Après avoir été chargé du service des recherches industrielles au ministère de l'Industrie (1979-1981), il a occupé plusieurs postes dans l'industrie chimique, dont celui de directeur de la R & D chimie du groupe Total jusqu'en 2004.

Jean-Philippe Sergent est ingénieur civil des Mines (Paris). Il a été chercheur au CEMEF de 1974 à 1976, avant de soutenir en 1977 une thèse à l'université Louis Pasteur de Strasbourg sur les procédés de fabrication de film. Il a effectué pratiquement toute sa carrière dans le groupe ETEX, devenu ALIAXIS, dont il a créé puis dirigé le département informatique jusqu'en 2009.

Bruno Vergnes est ingénieur ENSTA, docteur-ingénieur de l'École des Mines de Paris et docteur ès sciences. Il a travaillé de 1981 à 2008 dans le groupe de recherches « Écoulements viscoélastiques » avec J.-F. Agassant et M. Vincent. Il est actuellement directeur de recherche à l'École des Mines de Paris et responsable du pôle « Polymères et composites » au CEMEF. Ses domaines de compétence concernent principalement les procédés d'extrusion et des problèmes de rhéologie.

Michel Vincent est ingénieur civil des Mines (Saint-Étienne) et docteur-ingénieur de l'École des Mines de Paris. Il est actuellement directeur de recherches au CNRS et, au sein du pôle « Polymères et composites » du CEMEF, chargé plus spécialement des procédés de moulage et des polymères renforcés.

Cet ouvrage a été édité pour la première fois en 1982, puis réédité en 1986 et en 1996. Il a été traduit en langue anglaise en collaboration avec le Professeur Pierre J. Carreau de l'École Polytechnique de Montréal et édité par Hanser (1991). Cette nouvelle version française est totalement remaniée, tant par l'ordonnancement que par l'étendue des thèmes traités. Elle présente une synthèse des démarches de recherche et d'enseignement développées depuis plus de trente ans dans le domaine de la transformation et de la mise en forme des polymères au CEMEF.

Nous tenons à citer tous les chercheurs, collègues, doctorants ou mastères spécialisés, qui ont appartenu ou qui appartiennent toujours au laboratoire, et dont les travaux ont contribué à la réalisation de cet ouvrage : H. Alles, J.M. André, G. Ausias, Ph. Barq, C. Barrès, S. Batkam, P. Beaufiles, M. Bellet, N. Bennani, C. Beraudo, F. Berzin, R. Blanc, F. Boitout, R. Bouamra, C. Champin, M. Coevoet, C. Combeaud, D. Cotto, T. Coupez, L. Delamare, Y. Demay, F. Démé, O. Denizart, E. Devilers, F. Dimier, T. Domenech, J.L. Dournaux, C. Dubrocq-Baritaud, R.

Ducloux, V. Durand, A. Durin, M. Espy, E. Foudrinier, E. Gamache, J.F. Gobeau, S. d'Halewyn, J.M. Haudin, I. Hénaut, C. Hoareau, S. Karam, M. Koscher, P. Laure, M. Leboeuf, D. Le Roux, W. Lertwimolnun, O. Mahdaoui, H. Maders, R. Magnier, B. Magnin, J. Mauffrey, M. Mouazen, Ph. Mourniac, B. Neyret, I. Noé, H. Nouatin, C. Peiti, S. Philipon, A. Philippe, A. Piana, E. Pichelin, A. Poitou, A. Poulesquen, S. Puissant, L. Robert, A. Rodriguez-Villa, P. Saillard, G. Schlatter, F. Schmidt, M.C. Serrat, D. Silagy, L. Silva, C. Sollogoub, G. Sornberger, B. Souloumiac, J. Tayeb, J. Teixeira-Pirès, R. Valette, C. Venet, E. Wey, J.L. Willien.

Nos remerciements leur sont adressés, ainsi qu'à tous ceux avec qui nous avons eu la chance de travailler, tant dans les Grandes Écoles et universités françaises et étrangères que dans l'industrie, sur les questions de rhéologie et de mise en forme des polymères.

Nous remercions enfin Corinne Matarasso qui a apporté un soin particulier à l'amélioration de nombreuses figures.

Sigles et abréviations

Majuscules

<i>A</i>	Pente de la vis dans la zone de compression
<i>B</i>	Pas de la vis
<i>Bur</i>	Taux de gonflage (en soufflage de gaine)
<i>C</i>	Couple Coefficient de Brewster Taux de conversion (réaction chimique)
<i>C_l</i>	Distance entre les axes d'une extrudeuse bivis
<i>C₁, C₂, C₁^g, C₂^g</i>	Coefficients de la loi WLF
<i>C</i>	Tenseur de Cauchy
<i>C⁻¹</i>	Tenseur de Finger
<i>D</i>	Coefficient de diffusion
<i>D, D_c</i>	Diamètre d'un capillaire
<i>D₁</i>	Diamètre du fourreau (extrusion monovis)
<i>D₂, D_{2a}, D_{2p}</i>	Diamètre du corps de la vis, en zone d'alimentation, en zone de pompage (extrusion monovis)

D_e, D_i	Diamètre extérieur et intérieur de la vis (extrusion bivis)
Dr, Dr_c, Dr^*	Taux d'étirage, taux d'étirage critique
E, E_e, E_a	Énergie interne, énergie d'activation, énergie d'activation d'une réaction chimique
E	Module d'Young
F, F^*F_s, F_l	Force, force adimensionnelle, force stationnaire, perturbation
F_m	Force de masse
F_d, F_p	Facteurs correcteurs (en extrusion)
F	Vecteur force de masse (composantes F_x, F_y, F_z)
F_H	Force hydrodynamique
F_B	Force due au mouvement brownien
G	Module
G_N^0	Module au plateau
G'	Module de stockage (élastique)
G''	Module de dissipation (visqueux)
G^*	Module complexe
H	Enthalpie
H, H_a, H_p	Profondeur du chenal de la vis, dans la zone d'alimentation, de pompage
H^*	Profondeur du chenal de la vis pour laquelle la pression est maximale (extrusion monovis)
I_p	Indice de polymolécularité
I_1, I_2, I_3	Invariants d'un tenseur
I	Moment d'inertie
I	Tenseur identité
J_1, J_2, J_3	Invariants d'un tenseur
K, K_0	Consistance (loi puissance), consistance à la température de référence T_0
L, L_a, L_c, L_p	Longueurs
M	Masse molaire moyenne
M_n	Masse molaire en nombre
M_w	Masse molaire en poids
M_0	Masse molaire de l'unité monomère

M_c	Masse molaire critique
M_e	Masse molaire entre enchevêtrements
N	Vitesse de rotation d'une vis
N_1, N_2	Première et deuxième différence de contraintes normales
N_e	Nombre de monomères entre enchevêtrements
P, P_0	Pression
Q	Débit volumique
Q_c, Q'_c	Débit de cisaillement
Q_{ch}	Débit volumique par chenal (extrusion bivis)
Q_m	Débit massique
Q_p, Q'_p	Débit de contre-pression
\dot{Q}	Taux de chaleur reçu par le système
R_c	Résistance thermique de contact
$R, R_b, R_c, R_i, R_e, R_s$	Rayon
R_m, R_p	Rayon de courbure méridien et parallèle (en soufflage de gaine)
S	Surface, recouvrance de la déformation
S, S_0, S_e	Section courante, section initiale, finale (filage textile)
S	Tenseur d'orientation
T, T_f	Température, température du fluide
T_{air}	Température de l'air
T_b	Température du fourreau
T_g, T_{g0}	Température de transition vitreuse, température de transition vitreuse à pression nulle
T_i	Température d'interface
T_m	Température de fusion
T_p	Température du polymère à la paroi d'un outillage
T_r, T_{regul}	Température de régulation d'un outillage
T_s	Température de surface, température du polymère solide, température de la vis
T_0	Température initiale, température de référence
\bar{T}	Température moyenne
T	Vecteur contrainte (coordonnées T_x, T_y, T_z)

U	Vitesse
U	Vecteur déplacement (coordonnées U, V, W, U_i)
\bar{U}	Vecteur vitesse moyenne dans l'épaisseur (coordonnées \bar{u}, \bar{v})
V	Volume, volume spécifique
V_g	Vitesse de glissement
V_1	Vitesse équivalente de rotation du fourreau
V_{1x}, V_{1z}	Composante de la vitesse du fourreau, perpendiculaire au chenal, selon l'axe du chenal de la vis
\bar{V}	Vitesse moyenne
W	Largeur, largeur du chenal de la vis
\dot{W}	Puissance dissipée par unité de volume
X, X'	Largeur du lit solide (zone de fusion de l'extrudeuse monovis)
Z, Z_a, Z_c, Z_p	Longueur d'un tour de vis déroulé, longueur déroulée de la zone d'alimentation, de compression, de pompage

Minuscules

a	Coefficient de Yasuda (loi de Carreau-Yasuda) diffusivité thermique
a_T	Facteur de glissement de la viscosité
\mathbf{a}_2	Tenseur d'orientation d'ordre 2 (fibres)
\mathbf{a}_4	Tenseur d'orientation d'ordre 4 (fibres)
b	Effusivité thermique
c	Capacité calorifique massique
c_s, c_l	Capacité calorifique massique du polymère solide, liquide
d	Diamètre d'une fibre, d'un capillaire
d^*	Diamètre critique d'un filament
e, e_0	Épaisseur
f	Coefficient de frottement entre le polymère solide et le métal
f_1, f_2	Coefficient de frottement sur le fourreau et la vis

h	Hauteur, entrefer
h^*	Localisation du point de pression maximale
h_c, h_r	Coefficient de transfert thermique par convection, par rayonnement
h_T, h_{Tb}, h_{Ts}	Coefficient de transfert thermique, avec le fourreau, avec la vis
$k, k_a, k_{air}, k_m, k_l$	Conductivité thermique, de l'acier, de l'air, du métal, du polymère liquide
l	Longueur des lèvres d'une filière plate
m	Indice de sensibilité à la vitesse de déformation
n	Vecteur normal (coordonnées n_x, n_y, n_z)
p	Pression hydrostatique
p_0	Pression thermodynamique
p'	Pression arbitraire (partie sphérique du tenseur des contraintes)
p_a	Pression atmosphérique
p_{max}	Pression maximale
p_s	Pression de sortie
p^*	Pression trou
p	Vecteur d'orientation d'une fibre (coordonnées p_i)
q	Débit par unité de largeur
q_x, q_y	Débit par unité de largeur dans la direction x, y
q	Vecteur densité de flux de chaleur
r	Vecteur bout à bout de la macromolécule
s	Entropie massique
s	Tenseur déviateur des contraintes
$t, t_{loc}, t_{min}, \bar{t}, \bar{t}_r, \bar{t}_{nr}$	Temps de séjour, temps de séjour local, minimum, moyen, pour les zones remplies, pour les zones non remplies
u	Vecteur vitesse (coordonnées u, v, w, u_i)
u_s	Vitesse du solide (zone d'alimentation de l'extrudeuse monovis)
u_0, u_f	Vitesse initiale, finale dans le procédé cast-film
\bar{u}, \bar{v}	Vitesse moyenne dans la direction x , dans la direction y
w_0, w_e, w_s, w_l	Vitesse initiale, finale en filage textile, stationnaire, perturbation

Lettres grecques

α	Angle
$\dot{\alpha}$	Taux d'élongation
β	Facteur de forme d'une fibre
γ	Déformation en cisaillement, accélération
γ_0	Amplitude de la déformation
$\dot{\gamma}, \dot{\gamma}_0$	Taux de cisaillement
$\dot{\gamma}_a, \dot{\gamma}_{a,g}, \dot{\gamma}_{a,l}, \dot{\gamma}_{a,r}$	Taux de cisaillement apparent
$\dot{\gamma}_p$	Taux de cisaillement à la paroi
$\bar{\gamma}$	Vitesse de déformation généralisée
δ	Symbole de Kronecker Épaisseur de la couche liquide au contact du fourreau
δ_f	Jeu entre l'arête de filet et le fourreau
ε	Déformation élongationnelle Émissivité thermique
ε_0	Amplitude de la déformation (rhéologie dynamique)
$\dot{\varepsilon}$	Vitesse de déformation généralisée
ε	Tenseur de déformation (petites déformations)
$\dot{\varepsilon}$	Tenseur des vitesses de déformation
$\bar{\varepsilon}$	Tenseur des vitesses de déformation moyen dans l'épaisseur d'une membrane
θ, θ_0	Angle
η, η_0, η_c	Viscosité, viscosité au palier newtonien, viscosité en cisaillement
η_a, η_{air}	Viscosité de l'air
$\eta^*, (\eta', \eta'')$	Viscosité complexe et composantes, viscosité adimensionnelle
$[\eta]$	Viscosité intrinsèque
η_E, η_E^+	Viscosité élongationnelle
λ	Temps caractéristique, temps de relaxation
μ	Viscosité (milieu compressible)
ν	Viscosité cinématique

	Volume spécifique
	Coefficient de Poisson
$(\rho, \rho_0), \rho_l, \rho_s, (\rho_a, \rho_{air})$	Masse volumique, du polymère liquide, solide, de l'air
σ_0	Contrainte d'écoulement
σ_I, σ_{II}	Contraintes principales (selon les directions principales du tenseur des contraintes)
σ_{AB}	Tension interfaciale
σ	Tenseur des contraintes
σ'	Tenseur des extracontraintes
$\bar{\sigma}$	Tenseur de contrainte moyen dans l'épaisseur d'une membrane
σ	Contrainte de traction
σ_n	Contrainte normale
τ, τ_p	Contrainte de cisaillement, contrainte de cisaillement à la paroi
τ_r	Taux de remplissage de l'extrudeuse bivis
τ_0	Contrainte de cisaillement, seuil d'écoulement
ϕ	Fraction volumique de charge, de phase dispersée déphasage
χ	Coefficient de piézo-dépendance de la viscosité Fraction volumique cristallisée Coefficient de compressibilité
ω	Pulsation
ΔH	Enthalpie de fusion
Δp_0	Correction de pression d'entrée (ou de Bagley)
ψ_1, ψ_2	Premier et deuxième coefficient des contraintes normales
Σ	Tenseur des contraintes de la loi d'Oldroyd-B
$\Omega, \Omega_0, \Omega_c$	Vitesse de rotation
Ω	Tenseur de rotation

Opérateurs

$d()$	Accroissement fini
$\Delta()$	Accroissement

δ	Fonction de Dirac
$\frac{\partial(\cdot)}{\partial(\cdot)}$	Dérivée partielle
$\frac{d(\cdot)}{dt}$	Dérivée particulière
∇	Opérateur gradient
$\nabla \cdot$	Opérateur divergence (d'un vecteur)
$(\cdot)^t$	Opérateur transposé
$\text{tr}(\cdot)$	Opérateur trace (d'un tenseur)
$(\cdot) \wedge (\cdot)$	Opérateur produit vectoriel
Δ	Opérateur laplacien
$\frac{\delta}{\delta t}$	Dérivation convective deux fois contravariante d'un tenseur (dérivation d'Oldroyd)
$\frac{D}{Dt}$	Dérivation de Jauman, dérivation convective doublement covariante (ou de Rivlin)
\exp	Fonction exponentielle
erf	Fonction erreur
\tanh	Fonction tangente hyperbolique
Log	Fonction logarithme népérien

Nombres sans dimension

Re, Re_x	Nombre de Reynolds
Fr	Nombre de Froude
We	Nombre de Weissenberg
De, De_0	Nombre de Deborah
Nu, Nu_{eq}, Nu_x	Nombre de Nüsselt
Br, Br_0	Nombre de Brinkman
Pe	Nombre de Peclet
Ca	Nombre de Cameron
	Nombre capillaire (ou nombre de Weber)
Ca^*	Nombre capillaire critique
Ra	Nombre de Rayleigh
Pr	Nombre de Prandtl
Gr	Nombre de Grashof
St	Nombre de Stanton

Grandeurs physiques

g	Accélération de la pesanteur ($9,81 \text{ m.s}^{-2}$)
k_B	Constante de Boltzman ($1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J.s}$)
R	Constante des gaz parfaits ($8,31 \text{ J.mole}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
h_P	Constante de Planck ($6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J.K}^{-1}$)
σ_B	Constante de Stefan-Boltzman ($5,671 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$)

Table des matières

Préface	III
Préface à la précédente édition	V
Présentation et remerciements	VI
Sigles et abréviations	IX
Introduction	1

Chapitre 1

Rappels de mécanique des milieux continus

1. Déformation et vitesse de déformation	9
1.1. Tenseur des déformations	9
1.2. Tenseur des vitesses de déformation	13
1.3. Équation de continuité	14
1.4. Exercices	15
2. Contraintes et équilibre des forces	21
2.1. Tenseur des contraintes	21
2.2. Équilibre dynamique	25
2.3. Exercices	27
3. Équations générales de la mécanique	29
3.1. Cas général	29
3.2. Cas de l'incompressibilité	29
3.3. Problème plan	30
3.4. Exercice : forme du tenseur des contraintes en cisaillement simple	30

Annexe 1 : Formulaire	32
Annexe 2 : Invariants d'un tenseur	36

Chapitre 2

Comportement rhéologique des polymères fondus

1. Viscosité : les équations de l'écoulement newtonien	39
1.1. Expériences de base du comportement newtonien	39
1.2. Généralisation à trois dimensions	41
1.3. Ordres de grandeur des forces mises en jeu	42
1.4. Équations de Navier-Stokes.	44
1.5. Exercices	45
2. Comportement pseudo-plastique (ou rhéofluidifiant)	53
2.1. Description phénoménologique.	53
2.2. Lois de comportement à une dimension	55
2.3. Explication physique de la pseudo-plasticité des polymères.	56
2.4. Lois de comportement à trois dimensions.	57
2.5. Application de la loi puissance à des écoulements simples	58
2.6. Exercices sur le comportement en loi puissance	60
3. Comportement des produits chargés	66
3.1. Comportement rhéologique des suspensions	66
3.2. Comportement de fluide à seuil	74
3.3. Exercice : écoulement de Poiseuille d'un fluide à seuil dans un tube ..	76
4. Comportement viscoélastique.	77
4.1. Phénomènes physiques	77
4.2. Viscoélasticité linéaire et modèle de Maxwell	81
4.3. Différence de contraintes normales en cisaillement simple.	86
4.4. Interprétation du gonflement en sortie de filière	89
4.5. Modèle de Maxwell convecté.	91
4.6. Nombres adimensionnels viscoélastiques	93
4.7. Quelques interprétations physiques du comportement viscoélastique des polymères à l'état fondu	94
4.8. Quelques lois de comportement viscoélastiques	97
4.9. Exercices sur la loi de comportement de Maxwell	100
5. Mesure du comportement rhéologique des polymères fondus	113
5.1. Rhéomètre capillaire, mesures de viscosité	113
5.2. Rhéomètre filière plate	124
5.3. Le problème du glissement à la paroi	126
5.4. Rhéomètre cône-plan	128
5.5. Rhéomètre plan-plan parallèle.	136
5.6. Rhéométrie élongationnelle.	137
5.7. Notions de rhéo-optique.	142
5.8. Perspectives	148
Annexe 1 : Physique de la viscosité	149

Annexe 2 : Une approche de la viscoélasticité : le modèle de l'altère élastique	157
Annexe 3 : Dérivation particulaire et dérivation convective	166
Annexe 4 : Correction de Rabinowitsch	171
Annexe 5 : Écoulement d'un fluide viscoélastique en géométrie cône-plan . .	172
Annexe 6 : Formulaire pour les principaux écoulements simples	177

Chapitre 3

Thermique et échanges de chaleur dans les procédés

1. Notions de base de la thermique	185
1.1. Premier principe de la thermodynamique	185
1.2. Expression du taux de chaleur reçu par le système	186
1.3. Expression de la puissance des efforts intérieurs	186
1.4. Équation de l'énergie	188
1.5. Expression de l'énergie interne-équation de la chaleur	189
1.6. Conditions aux limites	192
1.7. Résolution de l'équation de la chaleur	197
2. Problèmes de refroidissement ou de chauffage (dans un moule, dans l'air, dans l'eau)	197
2.1. Problèmes posés	197
2.2. Équation de la chaleur	199
2.3. Profondeur de pénétration de la chaleur	200
2.4. Température d'interface	202
2.5. Refroidissement (échauffement) d'une plaque	206
3. Thermique dans les écoulements de polymères	212
3.1. Importance de la puissance dissipée : le nombre de Brinkman	212
3.2. Notion de régime thermique	213
3.3. Équations du problème	214
3.4. Régime d'équilibre	216
3.5. Régime adiabatique	220
3.6. Régime transitoire dans le cas newtonien	221
3.7. Régime transitoire avec un fluide en loi puissance	228
3.8. Comparaison avec une solution exacte	228
3.9. Application à d'autres géométries d'écoulement	234
3.10. Exemple d'application	237
3.11. Conclusion	240
Annexe 1 : Échanges de chaleur par convection	241
Annexe 2 : Échanges de chaleur par rayonnement	252
Annexe 3 : Expression de l'énergie interne pour les matériaux compressibles . .	257

Chapitre 4

Méthodes d'approximation et méthodes de calcul

1. Équations d'un problème de mise en forme des polymères	261
2. Approximations concernant le choix de la loi de comportement rhéologique	263

3. Choix des conditions aux limites	265
3.1. Conditions aux limites concernant le champ de vitesse	265
3.2. Conditions aux limites concernant le transfert thermique	266
3.3 Conditions d'entrée	266
3.4 Conditions de sortie	267
4. Méthodes d'approximation	267
4.1. Approximations concernant la géométrie de l'écoulement.	267
4.2. Approximations concernant la cinématique	268
4.3. Approximations concernant la température	275
4.4. Conclusion et exemple d'application.	276
4.5. Exercices	278
5. Mécanismes de mise en pression des polymères fondus : les patins hydrodynamiques	282
5.1. Préambule	282
5.2. Analyse qualitative de quelques patins hydrodynamiques	283
5.3. Analyse du mécanisme de mise en pression créé par un rétrécissement brusque (patin de Rayleigh).	285
5.4. Calcul de l'écoulement dans un patin hydrodynamique d'entrefer variable : équation de Reynolds	286
5.5. Exercice : le patin de Reynolds	287
6. Méthodes de calcul.	288
6.1. Méthodes de calcul et type d'écoulement.	288
6.2. Résolution des écoulements unidirectionnels : méthode des tranches (ou incrémentale).	291
6.3 Résolution des équations de Hele-Shaw	292
6.4 Résolution des écoulements visqueux 2D et 3D par la méthode des éléments finis	296
6.5. Calcul des écoulements viscoélastiques isothermes	301
Annexe 1 : Analyse des approximations de la lubrification hydrodynamique.	304

Chapitre 5

Extrusion monovis et écoulements en filière

1. Extrusion monovis.	313
1.1. Description géométrique et cinématique	313
1.2. Zone d'alimentation	320
1.3. Zone de fusion	332
1.4. Zone de mise en pression	350
1.5. Modèle d'ensemble de l'extrusion monovis	372
1.6. Exercices	378
2. Filières d'extrusion	390
2.2. Description des géométries rencontrées	390
2.3. Rappels sur les hypothèses et les méthodes de calcul	394
2.4. Exemples de résultats	394
2.5. Conclusion	415

2.6. Exercices	415
3. Écoulements multimatériaux	420
3.1. Intérêt des écoulements multimatériaux et problèmes rencontrés	420
3.2. Étude de l'écoulement stationnaire de deux fluides visqueux entre deux plaques parallèles	423
3.3. Procédé de coextrusion en filière plate	428
3.4. Exercices	436
Annexe 1 : Calcul de la vitesse d'avancée du solide en extrusion monovis	439

Chapitre 6

Extrusion bivis et applications

1. Description générale du procédé d'extrusion bivis	445
1.1. Différents types d'extrudeuses bivis	445
1.2. Différents types d'écoulement	446
1.3. Spécificités de l'extrusion bivis	448
1.4. Géométrie de la vis et du fourreau	449
1.5. Approximations classiques	454
1.6. Différentes approches de la modélisation.	455
1.7. Extrudeuse de référence	455
2. Convoyage solide et fusion	456
2.1. Zone de convoyage solide	456
2.2. Zone de fusion	459
3. Écoulement à l'état fondu	463
3.1. Éléments de vis à pas direct ou inverse	464
3.2. Éléments de mélange	473
4. Modèle d'ensemble de l'extrusion bivis	482
4.1. Description générale	482
4.2. Distribution des temps de séjour	484
4.3. Exemple de résultats	489
5. Application à la réalisation de mélanges de polymères	493
5.1. Mécanismes élémentaires	494
5.2. Mise en place de la modélisation le long de l'extrudeuse et exemples de résultats	498
6. Application aux opérations de compoundage.	501
6.1. Différents types de mélange	501
6.2. Mélange distributif	502
6.3. Mélange dispersif : application à la réalisation de nanocomposites.	505
7. Application à l'extrusion réactive	513
8. Optimisation et extrapolation.	521
9. Conclusion	523
10. Exercice : modèle simplifié d'un élément malaxeur.	523

*Chapitre 7***Injection**

1. Présentation	533
2. Phase de remplissage	538
2.1. Spécificités de la phase de remplissage	538
2.2. Principales hypothèses et équations du problème	538
2.3. Écoulements unidirectionnels	540
2.4. Modèles de type « couche mince » ou modèles de Hele-Shaw	552
2.5. Calculs 3D	557
3. Phases de compactage et de maintien	561
3.1. Introduction	561
3.2. Calcul simplifié de la phase de compactage	563
3.3. Données physiques pour les calculs de compactage/maintien	565
3.4. Calcul	567
3.5. Conclusion	572
4. Contraintes et déformations résiduelles	572
4.1. Introduction	572
4.2. Phénomènes physiques principaux	573
4.3. Mesure des contraintes résiduelles	577
4.4. Calcul des contraintes résiduelles	579
5. Procédés d'injection non standard	579
5.1. Injection assistée par gaz (IAG)	579
5.2. Injection assistée par eau (IAE)	581
5.3. Injection multimatière	582
6. Injection de polymères renforcés de fibres courtes	585
7. Conclusion	587
8. Exercice	588
8.1. Remplissage d'un disque par le centre	588
8.2. Équilibrage d'un moule multi-empreinte	591

*Chapitre 8***Calandrage**

1. Introduction	601
2. Calandrage traditionnel	601
2.1. Présentation du calandrage	601
2.2. Problèmes du calandrage	603
2.3. Intérêt d'une modélisation du calandrage	604
2.4. Cinématique du calandrage	605
2.5. Modèle newtonien isotherme reposant sur les approximations de la lubrification hydrodynamique	608
2.6. Modèles newtoniens plus généraux	611
2.7. Modèle pseudo-plastique du calandrage	616
2.8. Phénomènes thermiques	620
2.9. Utilisation des modèles de calandrage	623

3. Calandrage de finition	625
3.1. Présentation	625
3.2. Modélisation du procédé	626
Annexe 1 : Calcul bidimensionnel de l'écoulement dans le bourrelet par une méthode d'éléments finis.	630

Chapitre 9

Procédés comportant un étirage

1. Généralité	635
2. Filage textile	635
2.1. Différentes situations de filage textile.	635
2.2. Étirage d'un fluide newtonien isotherme	637
2.3 Étirage d'un fluide viscoélastique isotherme	642
2.4. Étirage d'un fluide visqueux dans des conditions non-isothermes avec prise en compte des forces de masse et d'inertie	648
2.5. Vers un modèle plus général du filage textile	655
3. Notions de biétirage	656
3.1. Introduction	656
3.2. Notion de biétirage d'une éprouvette fluide newtonienne	656
4. Procédés d'extrusion de film à plat.	657
4.1. Présentation	657
4.2. Différentes approches cinématiques	659
4.3. Modèle 1D newtonien	661
4.4. Modèle membrane 1D	662
4.5. Modèles membrane 2D	669
4.6. Conclusion	674
4.7. Exercices	674
5. Procédé de soufflage de gaine	677
5.1. Description du procédé	677
5.2. Géométrie de la bulle	680
5.3. Équations du soufflage de gaine	681
5.4. Modèle newtonien non-isotherme	686
5.5. Modèle viscoélastique non isotherme	689
5.6. Modèle semi-empirique du soufflage de gaine	693
5.7. Conclusion	694
6. Fabrication de corps creux	695
6.1. Différents procédés de soufflage.	695
6.2. Procédé d'extrusion-soufflage.	697
6.3. Procédé d'injection-soufflage-biétirage	709
6.4. Conclusion	713
6.5. Exercices.	714
Annexe 1 : Résolution des équations du cast-film isotherme	722
Annexe 2 : Refroidissement des films dans l'air ou dans l'eau	728
Annexe 3 : Résolution des équations du soufflage de gaine (André, 1999) . .	736

Chapitre 10

Instabilités d'écoulement

1. Instabilités d'extrusion	749
1.1. Description des différents défauts observés en rhéométrie capillaire	749
1.2. Défauts d'extrusion des polymères linéaires	752
1.3. Défauts d'extrusion des polymères ramifiés	781
1.4. Synthèse et perspectives	792
2. Instabilités de coextrusion	793
2.1. Études expérimentales des instabilités de coextrusion	793
2.2. Modélisation des instabilités de coextrusion	797
2.3. Conclusion	804
3. Défauts du procédé de calandrage	805
3.1. Différents types de défauts	805
3.2. Interprétation du défaut de « matage »	807
3.3. Interprétation du défaut de « chevrons »	808
3.4. Interprétation du défaut de « fusées »	810
3.5. Conclusion	812
4. Instabilités d'étirage	813
4.1. Description des instabilités d'étirage	813
4.2. Modélisation de l'instabilité en filage textile	819
4.3. Modélisation de l'instabilité en étirage de film à plat	824
4.4. Modélisation des instabilités en soufflage de gaine	828
4.5. Conclusion	831
Index	839

Introduction

Le présent ouvrage s'adresse aux ingénieurs et techniciens des différents métiers de la plasturgie (transformation, construction des machines et des outillages, production et formulation des polymères et, plus généralement, conception de pièces en matière plastique), ainsi qu'aux étudiants et aux chercheurs des disciplines scientifiques concernées (physico-chimie des polymères, mécanique des milieux continus, rhéologie, modélisation, simulation numérique, etc.).

Le développement rapide des polymères synthétiques depuis les années 1960 est dû à la fois aux excellentes propriétés d'usage de ces matériaux et aux progrès considérables qui ont été réalisés au niveau de leur mise en œuvre.

1. ■ Des matériaux performants et innovants

Contrairement aux idées reçues, on constate que l'écobilan des polymères synthétiques est meilleur que celui de la plupart des matériaux concurrents pour la même application. On peut illustrer cela par plusieurs exemples :

– un récipient (une bouteille par exemple) en verre est beaucoup plus lourd que son équivalent en plastique ; il en résulte que, pour un volume de contenu donné, l'énergie nécessaire à la fabrication du récipient en plastique est plus faible et qu'en outre la dépense d'énergie dans le transport et la distribution (y compris en tenant compte du recyclage) est inférieure ;

– une enveloppe postale en film plastique a un plus faible coût énergétique que l’enveloppe en papier, du fait de son poids inférieur et des consommations d’eau nécessaires à la fabrication du papier ;

– un profilé en PVC pour le bâtiment est plus résistant dans le temps que le bois et plus isolant que l’aluminium.

L’avantage des polymères est dû fondamentalement à leur légèreté. Il est prouvé que leur remplacement systématique par d’autres matériaux se traduirait par un accroissement de dépense énergétique, donc une augmentation des rejets de CO₂ et une aggravation de la situation vis-à-vis du réchauffement climatique.

Les procédés de transformation des polymères contribuent à la bonne performance environnementale de ces matériaux de deux façons :

– leur faible consommation :

- en énergie, en particulier parce que les températures de mise en forme (inférieures à 250 °C) sont modérées par rapport à celles mises en jeu avec d’autres matériaux (de l’ordre de 1 000 °C pour le verre et les métaux),
- en eau industrielle, par rapport au papier ;

– leur capacité d’intégration des fonctions, qui permet souvent de réaliser un objet en une seule pièce là où il en faut plusieurs dans d’autres matériaux, ce qui élimine des contraintes et des coûts d’assemblage.

Cependant, des reproches sont régulièrement adressés aux polymères synthétiques sur le plan environnemental à long terme (20 ou 50 ans, voire plus).

2. ■ La préoccupation du très long terme

Les questions qui se posent sont de deux natures :

– la consommation d’énergie fossile (pétrole et gaz naturel), même si les plastiques ne représentent aujourd’hui, en contenu d’énergie équivalente, que 4 % de la consommation de pétrole ;

– la persistance des déchets plastiques dans l’environnement et plus particulièrement dans l’environnement marin.

Sur le premier point, il existe déjà des ressources autres que pétrolières et gazières qui sont utilisées : le sel marin ou d’origine géologique pour le PVC, des matières premières végétales pour certains polymères comme des polyamides, la cellulose et ses dérivés... Le développement progressif de l’usage de la biomasse pour produire des polymères biosourcés est possible à condition de ne pas impacter la filière agricole alimentaire. À long terme, au-delà des réserves de pétrole et de gaz naturel auxquelles les plastiques pourront faire appel plus largement qu’aujourd’hui, un retour à une carbochimie, mais avec des technologies propres, est parfaitement envisageable. On peut donc admettre que la question de

la matière première, qui de toute façon concerne la totalité des activités humaines, se résoudra progressivement, en fonction d'équilibres économiques qu'il est difficile de prévoir précisément.

Sur le deuxième point, la seule question difficile sur le très long terme est celle des déchets en mer. Le contrôle de ces rejets nécessite des décisions internationales contraignantes qui font encore défaut à ce jour. Sur les continents (que ce soit sur terre ou dans les rivières et les lacs, et même sur le littoral), il sera possible de renforcer le contrôle des rejets et de réparer les dommages sur la durée. Mais ce contrôle se conjugue bien entendu avec le développement des filières de recyclage, matière ou thermique. Une alternative est l'utilisation, dans des cas très particuliers, de polymères biodégradables. Toutefois, malgré une attente citoyenne certaine et de nombreuses études, ils ne pourront être utilisés dans toutes les applications.

Ces considérations sur le long et très long terme étant posées, venons-en à l'objet même du présent ouvrage : le passage des polymères de leur état « natif » (poudre ou granulés) à un demi-produit ou une pièce finie.

3. ■ Enjeux de la mise en forme des polymères

Au niveau de la transformation, les problèmes consistent à concevoir ou à régler les machines et outillages de façon à obtenir un produit satisfaisant au meilleur prix. Le produit « satisfaisant » suppose :

- les dimensions et l'aspect de surface voulus, compte tenu de gonflements, d'étirages, de retraits... ;

- une structure physique adaptée aux propriétés recherchées, ce qui nécessite selon les cas une certaine orientation moléculaire, un minimum de contraintes résiduelles dans la pièce, une structure cristalline déterminée (taille des cristallites et des sphérolites), une morphologie donnée, dans le cas des mélanges de polymères ou des produits chargés.

« Au meilleur prix » signifie :

- d'une manière générale, un minimum de déchets et de déclassés, donc un régime de fonctionnement stable et rapidement atteint ;

- un débit maximal en extrusion ou en calandrage, un temps de cycle minimal en injection ou en soufflage. Dans tous les cas, vis-à-vis de ces objectifs, il existe un optimum à trouver dans la conception des machines (vis, outillages...) et dans les réglages des paramètres opératoires (températures, vitesses, refroidissements...).

Au niveau de la production des polymères (et des additifs), le problème consiste à adapter le produit à un procédé de transformation donné et aux critères physiques recherchés (propriétés mécaniques, aspect...). Pour cela, on peut jouer sur :

- la structure moléculaire (distribution de masse molaire, copolymérisation, longueur et type des branchements...);
- la formulation (mélange de polymères, compatibles ou incompatibles, agents lubrifiants, *processing aids*, charges...).

Globalement, il s'agit de maîtriser les relations entre la formulation, le comportement rhéologique et l'aptitude à la transformation. Toutes ces questions relèvent de la mécanique, de la thermique et de la rhéologie, c'est-à-dire de la science des écoulements. Ces domaines sont très vastes et le présent ouvrage les aborde en se limitant aux notions utiles pour les études sur la transformation des polymères. Les notions et modèles présentés s'appliquent directement aux procédés de transformation et de mise en forme des matières thermoplastiques.

4. ■ Étapes de la transformation

Les procédés de transformation des matières thermoplastiques sont essentiellement thermomécaniques ; ils comportent trois étapes :

- la *fusion*, c'est-à-dire le passage de l'état de solide, en poudre ou en granulés, à un état fondu, suffisamment homogène et fluide. Ce terme de fusion recouvre plusieurs phénomènes physiques différents, suivant que le polymère est semi-cristallin ou amorphe. Toutefois, dans toute la suite et pour simplifier, nous utiliserons, quel que soit le polymère, les termes de *fusion* et d'*état fondu* ;
- la mise en forme à l'état fondu, par écoulement sous pression à travers une filière ou dans un moule ;
- la conformation et le refroidissement, avec éventuellement des opérations d'étirage, bi-étirage, soufflage...

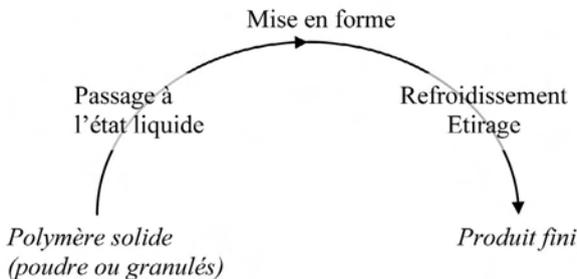


Figure 0.1. Processus général de mise en œuvre des polymères.

Les propriétés de l'objet fabriqué dépendent, bien entendu, du polymère choisi, mais également de ce « chemin thermomécanique » qu'il a suivi pour déboucher sur cet objet.

5. ■ Logique des procédés

Les caractéristiques physiques spécifiques des polymères ont conduit à des types de procédés de mise en œuvre adaptés.

5.1. Caractère isolant thermique des polymères fondus

La conductivité thermique des polymères est de l'ordre de $0,2 \text{ W.m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, soit mille fois moindre que celle du cuivre. Dans ces conditions, il faut environ :

- 17 min pour qu'un échauffement ou un refroidissement superficiel atteigne une profondeur de 1 cm ;
- 10 s pour une profondeur de 1 mm ;
- 0,1 s pour une profondeur de 0,1 mm.

Ceci montre que la fusion du polymère par simple conduction de chaleur dans un pot chauffant nécessiterait des temps de séjour très longs et des débits inadmissibles. C'est pourquoi tous les procédés de fusion nécessitent un apport important d'énergie mécanique, souvent bien supérieur à celui de la simple énergie thermique.

La faible conductivité thermique implique aussi que la majorité des produits en matière plastique ont une épaisseur inférieure à quelques millimètres, pour minimiser le temps de refroidissement et avoir des cadences de production élevées.

5.2. Très forte viscosité des polymères fondus

Les polymères fondus, aux températures de mise en œuvre, ont des viscosités de l'ordre de 10^3 Pa.s , soit un million de fois plus grandes que celle de l'eau. Cette propriété a trois conséquences pratiques :

- d'une part, le nombre de Reynolds, qui caractérise le poids des termes d'inertie par rapport aux termes de viscosité, est faible; il n'y aura jamais d'écoulement de polymère fondu turbulent et, mieux, les termes d'inertie seront souvent négligés devant les termes de viscosité ;
- d'autre part, l'échauffement du polymère par dissipation visqueuse est facile à obtenir et il est exploité dans les systèmes de fusion. Dans les conditions les plus courantes de fonctionnement en extrusion, les énergies apportées au polymère par chauffage et par dissipation visqueuse sont du même ordre de grandeur.

– enfin, les fortes viscosités impliquent des pressions élevées pour assurer les écoulements dans les filières et dans les moules à des débits importants, typiquement :

- 100 MPa ou plus comme pression d'injection,
- de 5 à 50 MPa en tête des extrudeuses, pour assurer l'écoulement dans les filières.

Cette pression est obtenue par deux méthodes principales. En injection, la vis, après arrêt de sa rotation dans la phase de fusion, agit comme un piston mu par un vérin pendant les phases de remplissage et post-remplissage de la cavité. En extrusion, le système vis-fourreau joue un rôle de pompe ; la pression engendrée en tête d'extrudeuse résulte de l'équilibre des pressions et des débits entre les écoulements dans le chenal de la vis d'une part et dans la filière d'autre part.

5.3. Combinaison du caractère isolant et d'une forte viscosité

L'échauffement par dissipation visqueuse est souvent localisé. La faible conductivité thermique favorise alors l'existence de gradients thermiques élevés. Compte tenu des risques de dégradation due à l'échauffement, ceci limite la quantité d'énergie qui peut être apportée par dissipation visqueuse ou les débits que l'on peut appliquer. D'autre part, la forte viscosité, associée à la faible conductivité, permet de concevoir le trajet dans l'air d'un extrudat encore à l'état fondu, avant son passage dans un conformateur ou dans un système d'étirage. Cette propriété a permis le développement de nombreux procédés en aval de l'extrusion :

- le filage, c'est-à-dire l'étirage d'un brin pour la fabrication des fibres textiles ;
- le soufflage, en discontinu, des bouteilles et autres corps creux ;
- le soufflage, en continu, des gaines ;
- l'étirage et le bi-étirage des films.

Ces procédés dérivent pour certains des techniques verrières.

5.4. Sensibilité de la viscosité à la vitesse de déformation et à la température

Typiquement, la viscosité d'un polymère fondu peut diminuer d'un facteur 5 quand on multiplie le taux de cisaillement par 10 et diminuer d'un facteur 2 quand on augmente la température de 20 °C. Si la viscosité des polymères était constante, le doublement du débit aboutirait à doubler la pression nécessaire à l'écoulement. La forte sensibilité de la viscosité à la vitesse de déformation et à la température autorise des variations importantes des paramètres de fonctionnement en conservant des pressions en tête de filière ou des pressions d'injection du même ordre de grandeur.

5.5. Viscoélasticité

Elle joue un rôle plus subtil. La viscoélasticité stabilise l'étirage ou le bi-étirage des polymères fondus. C'est elle qui facilite le filage des polymères à forte vitesse de déformation, le soufflage et le thermoformage en homogénéisant l'épaisseur des pièces obtenues. En revanche, les écoulements de cisaillement sont limités en débit par l'apparition d'instabilités, parfois d'origine viscoélastique, qui se traduisent par des défauts : « peau de requin » ou défauts volumiques en extrusion, instabilités d'interface en coextrusion... Enfin, la viscoélasticité est responsable du gonflement à la sortie des filières, qui complique singulièrement la conception de ces outillages.

6. Plan de l'ouvrage

La plupart des procédés, dont l'importance économique est illustrée sur la figure 0.2 pour les thermoplastiques de commodité, ont été cités dans cette introduction. Leurs principes de base résultent de quatre propriétés essentielles des polymères fondus : faible conductivité thermique, forte viscosité, dépendance à la vitesse de déformation et viscoélasticité.

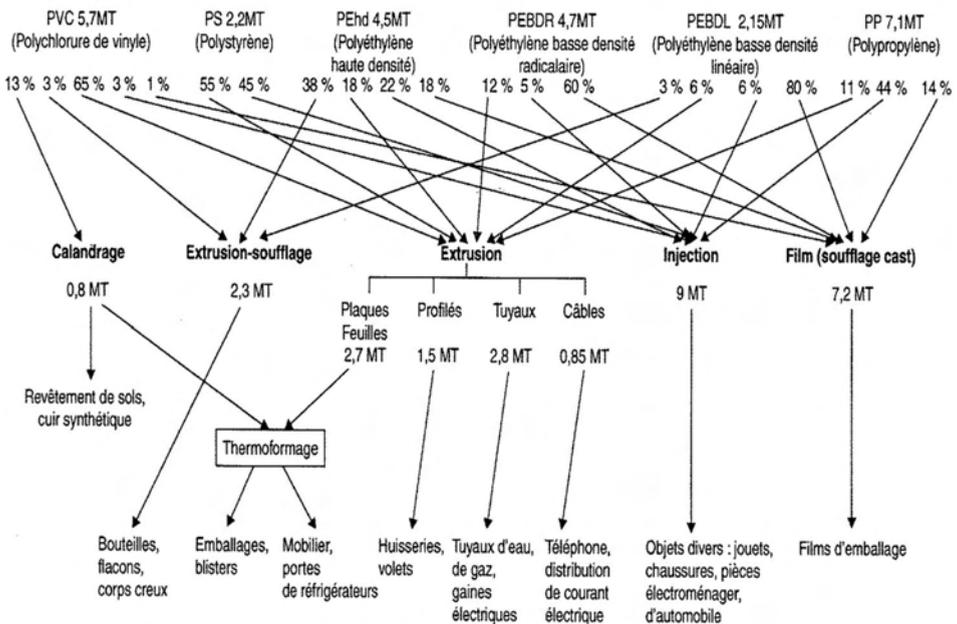


Figure 0.2. Consommation européenne des principaux polymères de commodité et application dans les principaux procédés de transformation (2002).

Le lecteur retrouvera dans les premiers chapitres le détail des notions physiques exposées succinctement ci-dessus :

- les bases de la mécanique des milieux continus dans le chapitre 1 ;
- les comportements rhéologiques et leurs méthodes de mesures dans le chapitre 2 ;
- les bases de thermique, leurs applications aux problèmes de chauffage, refroidissement et leur implication dans les écoulements au chapitre 3.

Le chapitre 4 fera une transition en exposant comment mettre en œuvre ces notions mécaniques et physiques pour comprendre et modéliser les procédés.

Les chapitres suivants sont consacrés aux procédés :

- l'extrusion monovis et les écoulements en filières dans le chapitre 5 ;
- l'extrusion bivis et ses applications au chapitre 6 ;
- le procédé d'injection au chapitre 7 ;
- le procédé de calandrage au chapitre 8
- les procédés comportant un étirage (filage, soufflage de corps creux, extrusion de film) au chapitre 9.

Le chapitre 10 est consacré aux instabilités et aux défauts qui représentent bien souvent la limitation de certains procédés.

Des exercices d'application et leurs solutions sont proposés tout au long de l'ouvrage pour permettre au lecteur de se familiariser avec les notions présentées.

Mise en forme des polymères

Approche thermomécanique de la plasturgie

L'ingénierie des polymères n'est pas chose aisée : technique en constante évolution, elle fait souvent appel à des concepts et des procédés complexes. *Mise en forme des polymères* a ainsi pour vocation d'en expliquer les éléments essentiels : compréhension des procédés, ordres de grandeur, bases pour l'utilisation des logiciels de conception...

Les notions physiques nécessaires telles que la mécanique des milieux continus, les comportements rhéologiques et leurs méthodes de mesure, la thermique et ses applications aux problèmes de chauffage-refroidissement ainsi que ses implications dans les écoulements sont analysées en détail dans les premiers chapitres. Une fois ces connaissances acquises et maîtrisées, sont abordés les différents procédés que sont l'extrusion monovis et les écoulements en filières, l'extrusion biviois et ses applications, l'injection, le calandrage et les procédés comportant un étirage.

De nombreux exercices et leurs solutions sont proposés tout au long de l'ouvrage afin de permettre au lecteur de se familiariser avec les notions présentées.

Largement revue et augmentée et abondamment illustrée, cette nouvelle édition constitue un **ouvrage de référence** indispensable pour maîtriser l'art de la plasturgie.

Pratique et didactique, *Mise en forme des polymères* s'adresse aux ingénieurs et techniciens de la profession, ainsi qu'aux étudiants de 2^e et 3^e cycles en sciences des polymères et en plasturgie.

Les auteurs de cet ouvrage appartiennent – ou ont appartenu – au Centre de mise en forme des matériaux (CEMEF) de l'École des Mines de Paris (aujourd'hui MINES ParisTech).

Jean-François Agassant est professeur et responsable du département « Mécanique et matériaux » de MINES ParisTech.

Pierre Avenas a dirigé le CEMEF lors de son implantation à Sophia-Antipolis et fut, par la suite, en charge de la R&D chimie du groupe Total (jusqu'en 2004).

Jean-Philippe Sergent, après sa thèse au CEMEF, a effectué la majeure partie de sa carrière dans le groupe Aliaxis, un leader mondial de la plasturgie.

Bruno Vergnes est directeur de recherche à MINES ParisTech et coordinateur du pôle « Polymères et composites » au CEMEF.

Michel Vincent est directeur de recherches au CNRS ; ses travaux au CEMEF concernent plus spécialement l'injection et les composites.

www.editions.lavoisier.fr



978-2-7430-1549-7