

80367

LA MISE EN FORME DES MATIÈRES PLASTIQUES

Jean-François AGASSANT • Pierre AVENAS
Jean-Philippe SERGENT • Bruno VERGNES • Michel VINCENT



Table des matières

Préface	III
Présentation et remerciements	V
Préambule.....	XIX
Chapitre 1 : Rappels de mécanique des milieux continus.....	1
1.1 Déformation et vitesse de déformation	1
1.1-1 Tenseur de déformation	1
a) Définition intuitive de la déformation	1
b) Notion de gradient de déplacement	2
c) Définition du tenseur de déformation	3
d) Variation de volume dans la déformation	6
1.1-2 Tenseur de vitesse de déformation	6
1.1-3 Equation de continuité	7
a) Conservation de la masse dans un écoulement.....	7
b) Cas d'un milieu incompressible	8
1.1-4 Exercices	8
a) Etude du cisaillement simple plan	8
b) Etude de plusieurs écoulements de cisaillement simple	9
c) Etude de l'élongation.....	11
1.2 Contraintes et équilibre des forces	12
1.2-1 Tenseur des contraintes	12
a) Définition intuitive des contraintes.....	12
b) Le vecteur contrainte.....	12
c) Le tenseur des contraintes	13
d) Le tenseur d'une pression hydrostatique	15
e) Le déviateur des contraintes.....	15
1.2-2 L'équilibre dynamique	16
a) Equilibre des forces	16
b) Equilibre des couples.....	17
1.2-3 Exercices	18
1.3 Equations générales de la mécanique.....	18
1.3-1 Cas général.....	18
1.3-2 Cas de l'incompressibilité	19
1.3-3 Problème plan	19
1.3-4 Exercice : forme du tenseur de contrainte en cisaillement simple.....	20
Annexe 1.1 : Formulaire.....	20
A.1.1.1 Formules en coordonnées cylindriques	20

A.1.1.2	Formules en coordonnées sphériques	22
Annexe 1.2	: Les invariants d'un tenseur	23
A.1.2.1	Rappels sur les tenseurs; les invariants	23
A.1.2.2	Invariants utilisés en mécanique	24
	Références bibliographiques	25
Chapitre 2	: Comportement rhéologique des polymères fondus	27
2.1	La viscosité - Les équations de l'écoulement newtonien	27
2.1-1	Les expériences de base du comportement newtonien	27
a)	Définition phénoménologique de Newton (1687)	27
b)	Expérience de Trouton - Notion de viscosité élongationnelle	27
2.1-2	Généralisation à trois dimensions	28
a)	Loi de comportement	28
b)	Écoulement en cisaillement simple	29
c)	Écoulement élongationnel uniaxial	29
2.1-3	Ordres de grandeur des forces mises en jeu	30
a)	Unités de viscosité - Ordres de grandeur	30
b)	Le nombre de Reynolds	30
c)	Le rôle de la gravité	31
2.1-4	Les équations de Navier-Stokes	31
2.1-5	Exercices	32
a)	Écoulement de cisaillement simple	32
b)	Écoulement de Poiseuille plan	33
c)	Superposition d'un écoulement de cisaillement simple et d'un écoulement de Poiseuille plan	33
d)	Écoulement de Poiseuille dans un tube	34
e)	Cisaillement simple entre deux disques	34
f)	Écoulement de Couette	34
g)	Écoulement dans un dièdre ou dans un cône	35
2.2	Le comportement pseudoplastique	35
2.2-1	Description phénoménologique	35
2.2-2	Lois de comportement à une dimension	36
a)	Loi-puissance	36
b)	Loi de Cross	37
c)	Loi de Carreau	37
2.2-3	Explication physique de la pseudoplasticité des polymères	37
2.2-4	Lois de comportement à trois dimensions	39
a)	Le liquide newtonien	39
b)	Le liquide de Rivlin	39
c)	Le liquide pseudoplastique (loi-puissance)	40
d)	Le liquide pseudoplastique quelconque	41
2.2-5	Application de la loi-puissance à des écoulements simples	41
a)	Cisaillement simple	41
b)	Écoulement de Poiseuille dans un tube	42
2.2-6	Exercices sur le comportement en loi-puissance	45
a)	Écoulement de Poiseuille plan	45

b)	Superposition d'un écoulement de cisaillement simple et d'un écoulement de Poiseuille plan	45
c)	Cisaillement simple entre disques	46
d)	Ecoulement de Couette	46
2.3	Le comportement viscoélastique	46
2.3-1	Phénomènes physiques	46
a)	Gonflement en sortie de filière	46
b)	Effet Weissenberg	47
c)	Dépendance du comportement par rapport au temps	48
2.3-2	Loi de comportement à une dimension	49
a)	Généralités sur les modèles viscoélastiques linéaires	49
b)	Le comportement d'un élément de Maxwell	50
c)	Interprétation qualitative des phénomènes dépendant du temps ..	51
2.3-3	Différence de contraintes normales en cisaillement simple	54
2.3-4	Interprétation du gonflement en sortie de filière	56
2.3-5	Le modèle de Maxwell convecté	58
a)	Dérivation particulière et dérivation convective	58
b)	Le modèle de Maxwell convecté	61
c)	Nombres sans dimension viscoélastiques	61
2.3-6	Quelques interprétations physiques du comportement viscoélastique des polymères à l'état fondu	62
2.3-7	Autres lois de comportement viscoélastiques	65
a)	Les différents types de lois viscoélastiques	65
b)	Choix du modèle rhéologique	67
2.3-8	Exercices sur la loi de comportement de Maxwell	68
a)	Cisaillement simple d'un liquide de Maxwell	68
b)	Cisaillement entre disques	68
c)	Ecoulement de Couette d'un fluide de Maxwell	69
d)	Etirage d'un liquide de Maxwell	70
2.4	Mesure des constantes rhéologiques des polymères fondus	70
2.4-1	Rhéomètre capillaire - Mesures de viscosité	70
a)	Présentation du rhéomètre capillaire - Principe de la mesure	70
b)	Exemple d'obtention d'une courbe de viscosité	72
c)	Influence de la température - Notion de courbe maîtresse	75
2.4-2	Rhéomètre filière plate	76
2.4-3	Le problème du glissement à la paroi	79
2.4-4	Rhéomètre cône-plan	80
a)	Présentation du rhéomètre cône-plan	80
b)	Fonctionnement en mode continu	81
c)	Fonctionnement en mode dynamique	86
d)	Fonctionnement en mode transitoire	89
2.4-5	Autres types de rhéomètres	89
a)	Rhéomètre plan-plan parallèle	89
b)	Rhéomètre plan-plan excentré (ou rhéomètre orthogonal)	90
2.4-6	Rhéométrie élongationnelle	91
a)	Les rhéomètres élongationnels	92
b)	Autres méthodes de mesure	92
2.4-7	Notions de rhéo-optique	93

a) Principe de la mesure et dispositif expérimental.....	94
b) Exemples de résultats expérimentaux.....	96
2.4-8 Perspectives	98
Annexe 2.1 : La physique de la viscosité.....	98
A.2.1.1 La théorie d'Eyring	98
A.2.1.2 Relation entre la masse moléculaire et la viscosité des polymères.	101
Annexe 2.2 : Une approche de la viscoélasticité, le modèle de l'altère élastique	104
A.2.2.1 L'intérêt du modèle.....	104
A.2.2.2 Description du modèle	105
A.2.2.3 Déformation de l'altère dans un cisaillement simple	106
A.2.2.4 Généralisation à un gradient de vitesse quelconque	110
A.2.2.5 Déformation d'une macromolécule dans un gradient longitudinal de vitesse.....	111
A.2.2.6 Conclusion	112
Annexe 2.3 : Variation de la viscosité avec la température et la pression	113
A.2.3.1 La loi d'Arrhénius	113
A.2.3.2 La loi W.L.F.....	114
A.2.3.3 Théorie de la viscosité liée au volume libre	115
A.2.3.4 Variation de la viscosité avec la pression	116
Annexe 2.4 : Dérivation particulaire et dérivation convective du tenseur des extra-contraintes - Cas particulier de la rotation d'un disque autour de son axe	118
A.2.4.1 La dérivation particulaire	119
A.2.4.2 La dérivation convective	119
Annexe 2.5 : La correction de Rabinowitsch	120
Annexe 2.6 : Formulaire pour les principaux écoulements simples	121
Références bibliographiques.....	122

Chapitre 3 : Thermique et échange de chaleur dans les procédés. 127

3.1 Les notions de base de la thermique	127
3.1-1 Premier principe de la thermodynamique.....	127
3.1-2 Expression du taux de chaleur reçu par le système.....	128
3.1-3 Expression de la puissance des efforts intérieurs.....	128
a) Calculs simples du travail de déformation.....	128
b) Généralisation	129
c) Puissance des efforts intérieurs, ou puissance dissipée	129
d) Cas des liquides newtoniens et pseudoplastiques (loi-puissance) .	130
3.1-4 Equation de l'énergie	130
3.1-5 Expression de l'énergie interne - équation de la chaleur	130
a) e dépend de la température T	130
b) Cas des matériaux compressibles	132
c) Prise en compte d'un changement d'état.....	133
3.1-6 Les conditions aux limites.....	133
3.1-7 Résolution de l'équation de la chaleur	135

3.2 Problèmes de refroidissement ou de chauffage (dans un moule, dans l'air, dans l'eau).....	137
3.2-1 Les problèmes posés	137
3.2-2 Equation de la chaleur	137
a) Dans un milieu immobile.....	137
b) Dans un milieu en mouvement	137
3.2-3 Profondeur de pénétration de la chaleur	138
3.2-4 Température d'interface.....	141
a) Transfert de chaleur purement conductif - notion d'effusivité....	141
b) Transfert de chaleur conductif et convectif.....	142
3.2-5 Refroidissement (échauffement) d'une plaque	145
a) Température imposée à la paroi	145
b) Flux de chaleur imposé à la paroi	147
3.3 La thermique dans les écoulements de polymères.....	150
3.3-1 Exemple de l'écoulement de Poiseuille d'un fluide newtonien dans un tube - Notion de régime thermique	151
a) Analyse qualitative et équation du problème.....	151
b) Régime d'équilibre	153
c) Régime adiabatique	154
d) Régime transitoire	155
e) Retour à la notion de régime thermique	157
f) Cas où la température initiale du polymère est différente de la température de régulation de la paroi	158
3.3-2 Généralisation au cas d'une loi de comportement pseudoplastique ..	161
3.3-3 Application à d'autres géométries d'écoulement.....	163
a) Application à l'écoulement de cisaillement simple entre plaques .	163
b) Application à l'écoulement de Poiseuille plan	166
3.3-4 Conclusion et exemple d'application	167
Annexe 3.1: Echanges de chaleur par convection	170
A.3.1.1 Convection libre et convection forcée.....	170
A.3.1.2 Le problème de Bénard	171
A.3.1.3 Les autres nombres sans dimension usuels.....	173
A.3.1.4 Les données physiques sur l'air et sur l'eau	175
A.3.1.5 Transfert thermique par convection libre dans divers systèmes ...	175
A.3.1.6 La convection forcée	178
Annexe 3.2 : Echanges de chaleur par rayonnement.....	181
A.3.2.1 Le corps noir	181
A.3.2.2 Les corps non noirs	182
A.3.2.3 Echanges de chaleur entre deux corps gris par rayonnement.....	183
A.3.2.4 Exemple de détermination de coefficient de transfert thermique par rayonnement	184
Annexe 3.3 : Analogie entre transfert de chaleur et transfert de quantité de mouvement.....	185
A.3.3.1 Transfert de quantité de mouvement	185
A.3.3.2 Contact entre deux liquides non miscibles de viscosités différentes	186
Annexe 3.4 : Expression de l'énergie interne pour les matériaux compressibles	186
Références bibliographiques.....	188

Chapitre 4 : Méthodes d'approximation et méthodes de calcul ...	191
4.1 Méthodes d'approximation	191
4.1-1 Généralités	191
4.1-2 Les approximations concernant le choix de la loi de comportement rhéologique	192
4.1-3 Les approximations concernant la géométrie de l'écoulement	194
a) Déroulement ou mise à plat d'une géométrie annulaire ou hélicoïdale	194
b) Décomposition d'un écoulement complexe en plusieurs écoulements simples	195
4.1-4 Les approximations concernant la cinématique	197
a) Approximations de la lubrification hydrodynamique	197
b) Approximation du fil ou du film mince	201
4.1-5 Les approximations concernant le transfert thermique	202
4.1-6 Conclusion	203
4.1-7 Exercices	204
a) Ecoulement dans un dièdre	204
b) Ecoulement dans un tronc de cône	205
4.2 Méthodes de calcul	205
4.2-1 Méthodes de calcul et type d'écoulement	205
a) Ecoulements de cisaillement simple ou d'élongation simple isothermes	206
b) Ecoulements unidirectionnels isothermes	206
c) Ecoulements de cisaillement ou d'élongation unidirectionnels non-isothermes	206
d) Ecoulements bidirectionnels de type couche mince (isothermes ou non-isothermes)	207
e) Ecoulements bidimensionnels ou tridimensionnels	207
4.2-2 Résolution des écoulements unidirectionnels ; méthode des tranches (ou incrémentale)	207
4.2-3 Résolution des équations de Hele-Shaw	208
a) Cas newtonien isotherme	208
b) Cas non-newtonien visqueux isotherme	211
c) Résolution de l'équations de Hele-Shaw dans le cas non-isotherme (résolution en température moyenne)	212
4.2-4 Résolution des équations de l'écoulement newtonien bidimensionnel isotherme en fonctions de courant et de tourbillon ..	212
4.2-5 Résolution des écoulements visqueux bidimensionnels (ou tridimensionnels) en variables vitesse et pression	214
a) Dans le cas isotherme	214
b) Dans le cas non-isotherme	217
4.2-6 Calcul des écoulements viscoélastiques isothermes	218
Annexe 4.1 : Analyse des approximations de la lubrification hydrodynamique .	221
A.4.1.1 Introduction	221
A.4.1.2 Analyse de l'importance relative des termes du tenseur des vitesses de déformation	223
A.4.1.3 Simplification des équations de l'équilibre dynamique	224

Annexe 4.2	Les mécanismes de mise en pression des polymères fondus ; les patins hydrodynamiques	225
A.4.2.1	Préambules	225
A.4.2.2	Analyse qualitative de quelques patins hydrodynamiques	226
A.4.2.3	Analyse du mécanisme de mise en pression créé par un retrécissement brusque (patin de Rayleigh)	228
A.4.2.4	Calcul de l'écoulement dans un patin hydrodynamique d'entrefer variable - Equation de Reynolds	229
A.4.2.5	Exercice : le patin de Reynolds	230
Références bibliographiques		230
Chapitre 5 : Les procédés d'extrusion		233
5.1	Introduction	233
5.2	L'extrusion monovis	235
5.2-1	Description géométrique	235
a)	Les différentes zones de l'extrudeuse	235
b)	La géométrie de la vis	236
c)	Description du chenal de la vis	237
d)	Les approximations classiques	238
e)	L'extrudeuse de référence	240
5.2-2	Zone d'alimentation	241
a)	Mécanisme de déplacement du polymère	241
b)	Description physique du frottement polymère/métal	241
c)	Le principe de la vis d'Archimède	242
d)	Le modèle de Darnell et Moll	245
e)	Calcul du débit et optimisation	247
f)	Le rôle de la pression	248
g)	Améliorations du modèle	250
h)	Conséquences technologiques	251
5.2-3	Zone de plastification	251
a)	Description physique des phénomènes	251
b)	Initiation du processus de plastification	255
c)	Le modèle de plastification de Tadmor et Klein	256
d)	Les autres modèles	263
e)	Conséquences technologiques - Les vis barrières	264
5.2-4	Zone de mise en pression	266
a)	Zone de pompage	267
b)	Zone de compression	275
c)	Rôle du jeu vis /fourreau	277
d)	Etude des phénomènes thermiques	278
e)	Notion de caractéristiques	281
f)	Améliorations du modèle	282
g)	Conséquences technologiques	283
5.2-5	Modèle d'ensemble de l'extrusion monovis	285
a)	Introduction	285
b)	Exemples de résultats	286
c)	Conclusions	289

5.2-6	Application à la plastification en injection	290
5.2-7	Exercices	292
a)	Initiation de la plastification	292
b)	Régime de plastification par poche liquide	293
c)	Critères de choix d'une extrudeuse	294
5.3	L'extrusion bvis	295
5.3-1	Description générale du procédé d'extrusion bvis	295
a)	Les différents types d'extrudeuses bvis	296
b)	Les différents types d'écoulement	297
c)	Spécificités de l'extrusion bvis	298
d)	Géométrie de la vis et du fourreau	299
e)	Les approximations classiques	303
f)	L'extrudeuse de référence	304
5.3-2	Convoyage solide et fusion	305
a)	Zone de convoyage solide	305
b)	Fusion	307
5.3-3	Écoulement à l'état fondu	309
a)	Éléments de vis à pas direct ou inverse	310
b)	Éléments de mélange	318
5.3-4	Modèle d'ensemble de l'extrusion bvis	323
a)	Mise en série et point d'équilibre	323
b)	Exemples de résultats	326
5.3-5	Exercice : modèle simplifié d'un élément malaxeur	329
	Références bibliographiques	330

Chapitre 6 : Écoulement dans les outillages..... 335

6.1	Le calandrage	335
6.1-1	Présentation du calandrage	335
6.1-2	Analyse newtonienne symétrique - utilisation des approximations de la lubrification hydrodynamique	337
a)	Validité des approximations de la lubrification hydrodynamique	337
b)	L'équation de Reynolds	338
c)	Calcul de la reprise d'épaisseur	338
d)	Calcul des efforts de calandrage	339
6.1-3	Analyse newtonienne bidimensionnelle générale	340
a)	Equations et conditions aux limites	340
b)	Méthode d'éléments finis	342
c)	Résolution itérative	342
d)	Résultats	342
6.1-4	Prise en compte d'une loi de comportement pseudoplastique	343
a)	Equation de Reynolds généralisée	344
b)	Intégration de l'équation de Reynolds généralisée et calcul des grandeurs macroscopiques du contact	345
6.1-5	Les effets thermiques en calandrage	347
6.1-6	Conclusions	349
6.2	Les filières d'extrusion	352

6.2-1	Introduction - Le rôle d'une filière d'extrusion	352
6.2-2	Description des géométries rencontrées	352
a)	Les filières de gaines	352
b)	Les filières de tubes	352
c)	Les filières de plaques	353
d)	Les filières de profilés	354
e)	Les filières de câblerie	355
6.2-3	Rappels sur les hypothèses et les méthodes de calcul	355
6.2-4	Exemples de résultats	356
a)	Filière de gaine	356
b)	Filière de tube	361
c)	Filière de plaque	366
d)	Filière de câblerie	368
e)	Filière de profilé	372
6.2-5	Conclusion	375
6.2-6	Exercices	376
a)	Ecoulement dans une filière plate : 1 ^{er} exemple	376
b)	Ecoulement dans une filière plate : 2 ^e exemple	377
6.3	Les écoulements multimatériaux	378
6.3-1	Intérêt des écoulements multimatériaux et problèmes rencontrés	378
6.3-2	Etude de l'écoulement stationnaire de deux fluides visqueux dans une géométrie simple	380
a)	Conditions de continuité à l'interface	380
b)	Calcul de l'écoulement bi-couche newtonien	381
c)	Généralisation au cas pseudoplastique	383
6.3-3	Le procédé de coextrusion en filière plate	384
a)	Description des procédés	385
b)	Approche monodimensionnelle	386
c)	Approche bidimensionnelle	390
d)	Approche bidimensionnelle de type couche mince	390
6.3-4	Exercices	392
a)	Ecoulement de coextrusion tri-couche entre plaques parallèles	392
b)	Ecoulement de coextrusion dans un capillaire	393
6.4	Les moules d'injection	394
6.4-1	Présentation	394
6.4-2	Le remplissage des moules	397
a)	Les spécificités de la phase de remplissage	397
b)	Principales hypothèses	397
c)	Ecoulements unidirectionnels	398
d)	Première approche des moules complexes : modèles par réseau, ou "1,5 D"	408
e)	Deuxième approche des moules complexes : modèles de type "2D couche mince", ou modèles de Hele-Shaw	410
f)	Modèles bidimensionnels	413
6.4-3	Le compactage	416
a)	Introduction	416
b)	Calcul	417
c)	Conclusion	420

6.4-4	Les contraintes et déformations résiduelles.....	420
a)	Introduction	420
b)	Les phénomènes physiques principaux.....	421
c)	Mesure des contraintes résiduelles	423
d)	Calcul des contraintes résiduelles.....	423
6.4-5	Conclusion.....	424
6.4-6	Exercices	425
	Références bibliographiques.....	425
	Chapitre 7 : Procédés comportant un étirage.....	431
7.1	Le filage textile.....	431
7.1-1	Les différentes situations de filage textile	431
7.1-2	Etirage d'un fluide newtonien isotherme.....	433
a)	Hypothèse cinématique.....	433
b)	Les équations du problème	434
c)	Résolution des équations	434
d)	Exemples d'application	435
e)	Test des différentes approximations effectuées.....	436
7.1-3	Etirage d'un fluide de Maxwell isotherme.....	437
a)	Les équations du problème	437
b)	Adimensionnalisation	438
c)	Résolution	439
d)	Résultats	440
7.1-4	Etirage d'un fluide visqueux dans des conditions non-isothermes ..	442
a)	Modifications des équations de la mécanique.....	442
b)	L'équation de bilan thermique.....	444
c)	Résolution couplée des équations mécaniques et thermiques.....	446
d)	Résultats	447
7.1-5	Modèle général du filage textile.....	448
7.2	Notions de biétirage - Application à l'extrusion de film à plat	449
7.2-1	Introduction	449
7.2-2	Préambule : notion de biétirage d'une éprouvette fluide newtonienne.....	449
7.2-3	Les procédés d'extrusion de film à plat	450
7.2-4	Modèle newtonien isotherme	451
a)	Présentation	451
b)	Hypothèse cinématique générale.....	452
c)	Hypothèse cinématique particulière	453
d)	Le tenseur des contraintes.....	454
e)	Les autres équations du problème	454
f)	Méthode de résolution	455
g)	Exemple de résultats.....	457
7.2-5	Modèle viscoélastique isotherme.....	457
a)	Expression du tenseur des contraintes	457
b)	Résolution.....	459
c)	Résultats	460
7.2-6	Autres modèles	462

a) Prise en compte d'une épaisseur non constante selon la largeur ..	462
b) Prise en compte des forces de masse dans le cas où l'étirage n'est pas vertical	464
c) Prise en compte de l'évolution de la température du film	465
7.2-7 Exercices	466
a) Etirage d'un film de largeur constante	466
b) Extrusion de tubes	466
7.3 Le soufflage de gaine	467
7.3-1 Description du procédé	467
7.3-2 Géométrie de la bulle	468
7.3-3 Cinématique de la bulle	469
7.3-4 Mécanique de la bulle	470
a) Equilibre mécanique dans le sens de l'étirage et contraintes méridiennes	470
b) Equilibre des forces suivant la normale au film	174
c) Ordre de grandeur des contraintes	472
7.3-5 Thermique de la bulle	473
7.3-6 Loi de comportement et modèle prédictif	474
a) Modèle newtonien isotherme	474
b) Modèle newtonien non-isotherme	476
c) Modèle viscoélastique	477
d) Prise en compte de la transition solide-liquide	478
7.3-7 Les modèles explicatifs du soufflage de gaine	479
7.3-8 Perspectives	481
7.4 Le soufflage de corps creux	481
7.4-1 Les différents procédés de soufflage	481
a) L'extrusion-soufflage	481
b) L'injection-soufflage	482
c) Les problèmes rencontrés	484
7.4-2 Les deux grands types d'approche mécanique : membrane, coque épaisse	484
a) Soufflage d'une membrane newtonienne ($R_1 \approx R_2 \approx R$)	484
b) Soufflage d'un tube épais newtonien	486
c) Comparaison entre les deux modèles	489
7.4-3 Incidence de la loi de comportement	491
a) Soufflage d'une membrane viscoélastique	491
b) Soufflage d'un tube épais viscoélastique	493
c) Conclusion	494
7.4-4 Exemple d'application : étirage-soufflage d'une bouteille	495
7.4-5 Exercice : gonflage d'une bulle sphérique	498
Annexe 7.1 Refroidissement des films dans l'air ou dans l'eau	499
A.7.1.1 Position du problème	499
A.7.1.2 Résolution	500
A.7.1.3 Cas du refroidissement au contact de l'air	500
A.7.1.4 Cas du refroidissement au contact de l'eau	503
Références bibliographiques	505

Chapitre 8 : Les instabilités d'écoulement	509
8.1 Les instabilités d'extrusion	509
8.1-1 Description des différents défauts observés en rhéométrie capillaire.....	509
8.1-2 Les défauts d'extrusion des polymères linéaires	512
a) Le défaut de "peau de requin"	512
b) Le défaut "oscillant"	518
8.1-3 Les défauts d'extrusion des polymères ramifiés.....	527
8.1-4 Synthèse et perspectives	531
8.2 Les instabilités d'étrirage.....	532
8.2-1 Description des instabilités d'étrirage.....	532
a) Exemple du filage textile	532
b) Exemple de l'étrirage de film à plat	533
8.2-2 Modélisation de l'instabilité en filage textile	533
a) Cas d'un fluide newtonien isotherme.....	534
b) Influence des phénomènes thermiques	535
c) Cas d'un fluide viscoélastique.....	536
8.2-3 Modélisation de l'instabilité en étrirage de film à plat.....	537
8.2-4 Conclusion.....	538
8.3 D'autres exemples d'instabilités.....	538
8.3-1 Introduction	539
8.3-2 Les défauts en calandrage du polychlorure de vinyle (PVC)	539
a) Les différents types de défauts.....	539
b) Interprétation du défaut de "matage"	541
c) Interprétation du défaut de "chevrons"	541
d) Interprétation du défaut de "fusées"	542
8.3-3 Les défauts observés en coextrusion	544
a) Description des défauts d'interface et premières interprétations.....	545
b) Analyse de la stabilité de l'écoulement stratifié.....	546
Références bibliographiques.....	547
Chapitre 9 : Solutions des exercices	553
9.1 Solutions des exercices du chapitre 1	553
9.2 Solutions des exercices du chapitre 2.....	557
9.3 Solutions des exercices du chapitre 4.....	575
9.4 Solutions des exercices du chapitre 5.....	579
9.5 Solutions des exercices du chapitre 6.....	589
9.6 Solutions des exercices du chapitre 7.....	596
Notations	601
Index	609