

# 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 multimatières .....	420
3.1. Intérêt des écoulements multimatières 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. Equilibrage d'un moule multi-empainte . . . . .	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