

Traité d'aérodynamique compressible

*volume 3
applications
de la théorie des caractéristiques
et écoulements transsoniques*

Jean Délery

TABLE DES MATIÈRES

Introduction. Les ondes et leur propagation	11
Chapitre 1. Ecoulements supersoniques stationnaires bidimensionnels et théorie des caractéristiques	13
1.1. La théorie des caractéristiques : introduction	13
1.2. Equations intrinsèques pour les écoulements plans ou de révolution	14
1.3. Problème de Cauchy et relations caractéristiques	20
1.4. Relations caractéristiques pour un écoulement plan d'un gaz calorifiquement parfait	26
1.5. Applications de la théorie des caractéristiques	28
1.5.1. L'onde simple de détente	28
1.5.2. Cas limite de la détente de Prandtl-Mayer	33
1.5.3. Angle de détente limite	37
1.5.4. L'onde simple de compression	38
Chapitre 2. La méthode numérique des caractéristiques	43
2.1. Remarques introductives	43
2.2. Les opérateurs de base	44
2.2.1. Point courant dans un écoulement : opérateur N	44
2.2.2. Point sur une paroi : opérateur P	47
2.2.3. Point sur une frontière libre : opérateur J	48
2.2.4. Point sur un axe de révolution : opérateur A	49
2.2.5. Origine d'une détente centrée : opérateur Q	51
2.3. Calcul d'un champ supersonique	53
2.3.1. Domaines de dépendance et d'influence	53
2.3.2. Prolongement du calcul : prise en compte d'une condition aux limites	55
2.4. Quelques exemples de calcul	56

Chapitre 3. Application au calcul des tuyères supersoniques 59

3.1. Principe général.	59
3.2. Calcul du domaine transsonique.	59
3.2.1. L'équation du potentiel en écoulement compressible.	59
3.2.2. Méthode de développement de Carrière.	63
3.2.3. Méthode de petites perturbations de Sauer.	67
3.3. Calcul de l'écoulement dans une tuyère de forme donnée : mode direct.	70
3.4. Calcul du contour d'une tuyère produisant un écoulement donné : mode inverse ou design.	72
3.5. Exemple de définition du contour d'une tuyère bidimensionnelle plane	77
3.6. Rhombe de Mach d'une tuyère.	78

Chapitre 4. Ecoulements avec ondes de choc. Méthode des caractéristiques rotationnelle 81

4.1. Onde de choc et écoulement rotationnel.	81
4.2. Origine d'un choc créé par une discontinuité de paroi	82
4.3. Origine d'un choc créé par une discontinuité de pression	83
4.4. Point d'un choc voisin de son origine	84
4.5. Origine d'un choc de focalisation	87
4.6. Point courant d'un choc	88
4.7. Exemples de calcul d'écoulements avec formation d'un choc	90
4.8. Application à l'étude de la structure d'un jet supersonique	92
4.9. Traînée de la bosse symétrique en supersonique	100

Chapitre 5. Ecoulements monodimensionnels instationnaires, non-visqueux et adiabatiques 105

5.1. Introduction	105
5.2. Equations générales	106
5.3. Ecoulement instationnaire isentropique dans un tube cylindrique.	108
5.3.1. Equations du mouvement	108
5.3.2. Problème de Cauchy et courbes caractéristiques	109
5.3.3. Relations caractéristiques. Invariants de Riemann	111
5.3.4. Cas d'un gaz calorifiquement parfait	113
5.3.5. Conditions initiales et aux limites.	114
5.3.6. L'onde de détente.	115
5.3.6.1. Propriétés générales	115
5.3.6.2. Cas du gaz calorifiquement parfait. Vitesse limite	123
5.3.6.3. L'onde de détente centrée	124
5.4. L'onde de compression	126

5.5. Croisement d'ondes de compression. Formation d'une onde de choc	128
5.6. Déformation d'une onde périodique et acoustique non linéaire.	131
5.7. Réflexion-réfraction d'une onde sur une surface de contact. Impédance acoustique	132
5.8. Retour sur les conditions aux limites.	135

Chapitre 6. Onde de choc instationnaire, surface de contact et réflexions d'ondes . . . 139

6.1. Les équations et relations de choc	139
6.2. Formation d'une onde de choc	144
6.3. Surface de contact	146
6.4. Réflexion d'une onde	148
6.5. Réflexions multiples.	150
6.6. Rencontre de deux ondes de choc	153
6.7. Impact d'une onde de choc sur une paroi fixe	157

Chapitre 7. Le tube à choc 163

7.1. Théorie générale	163
7.2. Tube à choc fermé à ses extrémités ou à choc réfléchi	170
7.3. Adaptation de la surface de contact (tailoring)	171
7.4. Simulation numérique du fonctionnement d'un tube à choc	175
7.5. Aménagement d'un tube à choc. Soufflerie à choc	180

Chapitre 8. Méthodes numériques pour le calcul des écoulements instationnaires . . . 185

8.1. Intégration par la méthode des caractéristiques	185
8.2. Intégration par différences finies	189
8.3. Condition de stabilité et critère CFL (Courant-Friedrich-Lewy)	198
8.4. Equations en coordonnées sphériques. Onde de choc sphérique	200
8.5. Amorçage et désamorçage d'une tuyère supersonique	204

Chapitre 9. Quelques propriétés des écoulements transsoniques 211

9.1. Introduction	211
9.2. Equation du potentiel pour les petites perturbations	212
9.3. Correction de compressibilité. La règle de Prandtl-Glauert	216
9.4. Théorie linéarisée pour les écoulements supersoniques	219
9.5. Equation pour le potentiel des petites perturbations en transsonique	226
9.6. Remarques finales sur l'équation du potentiel	227
9.7. Nombre de Mach critique d'un profil	228
9.8. Ecoulement transsonique autour d'un profil	230
9.9. Nombre de Mach de divergence de traînée.	233
9.10. Les profils supercritiques	235

Conclusion générale.	239
Annexe. Tableaux récapitulatifs des relations utiles	243
Bibliographie	251
Index	257
Sommaire volume 1	259
Sommaire volume 2	263