

Exercices et Problèmes d'Aérodynamique Fondamentale

*accompagnés des codes solutions en
python ou fortran*

Christophe Airiau, André Giovannini et Pierre Brancher



Cépaduès
ÉDITIONS

Sommaire

Introduction

1 - Équations locales de conservation et d'évolution	1
2 - Modèles mathématiques pour l'aérodynamique	7
3 - Théorie des potentiels complexes : application aux profils d'aile	19
4 - Théorie linéarisée des profils minces	61
5 - Théorie de la ligne portante de Lanchester-Prandtl	81
6 - Théorie de la surface portante et des corps élancés	121
7 - Aspects numériques : méthode des singularités	133
8 - Écoulements compressibles subsonique et transsonique	153
9 - Écoulements supersoniques linéarisés	173
10 - Écoulements compressibles monodimensionnels	197
11 - Écoulements supersoniques bidimensionnels	221
12 - Méthodes des caractéristiques en régimes stationnaire et instationnaire	255
13 - Corps élancés en écoulements supersoniques	275
14 - Écoulements hypersoniques	293
15 - Effets visqueux et couche limite	317
Bibliographie	365
Annexe 1 : algorithme de Newton	367
Annexe 2 : atmosphère standard 1976	368
Table des matières	369

Table des matières

Sommaire	i
Introduction	iv
1 Équations locales de conservation et d'évolution	1
Rappels	1
1.1 Équation de conservation de l'enthalpie massique h ①	3
1.2 Équation d'évolution de l'entropie massique s ①	4
1.3 Équations en variables primitives V et T ①	5
2 Modèles mathématiques pour l'aérodynamique	7
Rappels	7
2.1 Équations et nombres sans dimension ①	10
2.2 Notion de fluide parfait ①	12
2.3 Fonction de courant et potentiel des vitesses	13
2.3.1 Tourbillon ponctuel ①	13
2.3.2 Source ponctuelle ①	14
2.3.3 Doublet source-puits d'axe horizontal ②	15
2.3.4 Étirement pur ①	16
2.4 Atmosphère standard ①	17
3 Théorie des potentiels complexes : application aux profils d'aile	19
Rappels	19
3.1 Écoulement autour d'un cylindre et d'une sphère ②	23
3.2 Transformation de Joukowski ②	26
3.3 Transformation de Karman–Trefftz ①	33
3.4 Transformation de Von Mises ②	36
3.5 Transformation de Van de Vooren et Jong ①	38
3.6 Profil à double pointe et double courbure ②	41
3.7 Plaque plane en incidence ①	44
3.8 Introduction à la méthode des panneaux ②	47
3.9 Effet de sol ③	49
3.10 Ailes en tandem ③	52
3.11 Transformation de Schwarz et Christoffel : expansion dans un canal ③	54
3.12 Ovale de Rankine ③	57
4 Théorie linéarisée des profils minces	61
Rappels	61
4.1 Plaque plane en incidence ①	65
4.2 Profils de Joukowski ①	67
4.3 Famille de profils minces ①	69

4.4	Profil mince avec volet et bec ②	71
4.5	Lois de squelette et d'épaisseur ②	74
4.6	Braquage de volet ou de bec sur une aile rectangulaire supposée d'envergure infinie ②	76
4.7	Profil NACA 4 chiffres ②	78
5	Théorie de la ligne portante de Lanchester-Prandtl	81
	Rappels	81
5.1	Calcul analytique des coefficients A_n	85
5.1.1	Aile optimale elliptique ①	85
5.1.2	Vrillage d'une aile elliptique ①	87
5.1.3	Braquage d'un volet sur une aile elliptique ①	92
5.1.4	Calcul du foyer sur une aile elliptique ②	95
5.2	Sillages	97
5.2.1	Sillage tourbillonnaire de l'Airbus A380-800 ②	97
5.2.2	Corrections de soufflerie ②	99
5.2.3	Tourbillon en fer à cheval ②	102
5.2.4	Vol en formation ②	106
5.2.5	Tourbillons de sillage au voisinage du sol ①	108
5.3	Résolution numérique du problème de Prandtl	110
5.3.1	Cas général d'une aile en milieu infini ②	110
5.3.2	Ligne portante : aile avec effet de sol ②	118
6	Théorie de la surface portante et des corps élancés	121
	Rappels	121
6.1	Évolution du coefficient de portance d'une aile avec l'allongement ①	125
6.2	Aile en forme de Delta ①	126
6.3	Distribution de pression sur un ellipsoïde ③	127
7	Aspects numériques : méthode des singularités	133
	Rappels	133
7.1	Profils, solution analytique pour la validation	135
7.1.1	Profil symétrique de Van de Vooren et Jong ②	135
7.1.2	Squelette cambré de forme parabolique ①	138
7.2	Étude de différentes distributions de singularités	141
7.2.1	Méthode des tourbillons discrets : squelette cambré ②	141
7.2.2	Distribution de sources ponctuelles, approche de Neumann : profil de Van de Vooren et Jong sous incidence nulle ③	144
7.2.3	Distribution uniforme de sources et de doublets, approche Dirichlet : profil de Van de Vooren et Jong en incidence ④	146
8	Écoulements compressibles subsonique et transsonique	153
	Rappels	153
8.1	Écoulement subsonique isentropique	155
8.1.1	Pression totale et pression isentropique ①	155
8.1.2	Tube de Pitot en régime compressible ①	156
8.2	Écoulement transsonique	158
8.2.1	Corrections de compressibilité ①	158
8.2.2	Mach critique inférieur : effet de flèche ①	160
8.3	Écoulement au voisinage d'une paroi ondulée en régime subsonique ②	162
8.4	Écoulement au voisinage d'une paroi ondulée en régime transsonique ④	164
8.5	Écoulement transsonique autour d'un profil ①	171

9	Écoulements supersoniques linéarisés	173
	Rappels	173
9.1	Applications aux écoulements externes	176
9.1.1	Plaque plane ①	176
9.1.2	Écoulement proche d'une paroi ondulée : régime supersonique ②	177
9.1.3	Caractéristiques d'un profil losangique ①	179
9.1.4	Profil de traînée minimale ②	182
9.1.5	Profil lenticulaire ①	186
9.1.6	Interaction jet supersonique-profil ②	187
9.2	Écoulements en canal plan	191
9.2.1	Plaque plane en incidence dans un canal supersonique ①	191
9.2.2	Canal supersonique divergent ①	192
9.2.3	Profil losangique placé dans un canal supersonique ②	194
9.2.4	Remarque sur le plan de l'hodographe	196
10	Écoulements compressibles monodimensionnels	197
	Rappels	197
10.1	Calcul d'un choc droit	202
10.1.1	Exemple élémentaire ①	202
10.1.2	Compression par choc et compression isentropique ①	202
10.2	Écoulement dans une conduite	203
10.2.1	Écoulement de Fanno : régime amont subsonique ①	203
10.2.2	Écoulement de Fanno : régime amont supersonique ②	205
10.2.3	Écoulement de Rayleigh ①	206
10.2.4	Écoulement de Rayleigh : apport de chaleur par combustion ①	208
10.3	Mesure de vitesse par tube de Pitot	209
10.3.1	Régime subsonique ①	209
10.3.2	Régime supersonique ①	210
10.4	Tuyères	211
10.4.1	Différents régimes d'écoulement dans une tuyère ②	211
10.4.2	Poussée d'une tuyère de propulseur ③	214
10.4.3	Tuyère supersonique et tube de Pitot ①	220
11	Écoulements supersoniques bidimensionnels	221
	Rappels	221
11.1	Écoulement autour d'un profil	225
11.1.1	Coefficients aérodynamiques d'un profil en incidence ②	225
11.1.2	Plaque plane en incidence ①	226
11.1.3	Écoulement supersonique autour d'un profil losangique ②	229
11.1.4	Méthode choc-détente pour un profil lenticulaire ③	233
11.2	Autres géométries	235
11.2.1	Écoulement supersonique dans un canal : réflexions d'onde de choc ②	235
11.2.2	Interaction de deux chocs obliques de la même famille ②	237
11.2.3	Marche descendante en écoulement supersonique ①	239
11.3	Réflexion et interactions	241
11.3.1	Réflexion d'une onde de choc sur une ligne isobare ②	241
11.3.2	Réflexion d'un faisceau de détente sur une ligne isobare ②	242
11.3.3	Réflexion d'un faisceau de détente sur une paroi solide ②	244
11.3.4	Interaction onde de choc oblique - ligne de glissement ③	246
11.4	Tuyères	249
11.4.1	Tuyère : interaction d'ondes de chocs en sortie ③	249
11.4.2	Tuyère : interaction d'un faisceau de détente en sortie ②	251
11.4.3	Tracé de lignes caractéristiques dans le plan de l'hodographe ②	253

12 Méthodes des caractéristiques en régimes stationnaire et instationnaire	255
Rappels	255
12.1 Écoulement supersonique dans un canal plan ③	257
12.2 Tuyère de longueur minimale ④	262
12.3 Piston uniformément accéléré ①	267
12.4 Tube à choc ③	271
13 Corps élancés en écoulements supersoniques	275
Rappels	275
13.1 Solutions élémentaires pour un point source ①	278
13.2 Obstacle conique ②	280
13.3 Ogive parabolique ③	283
13.4 Optimisation sur le corps de Sears ④	286
13.5 Mach amont minimal sur un corps conique ②	291
14 Écoulements hypersoniques	293
Rappels	293
14.1 Profils losangique et triangulaire ②	298
14.2 Plaque plane ①	301
14.3 Écoulement autour de cônes ou de dièdres ②	303
14.4 Méthodes de calcul pour les obstacles pointus ③	305
14.5 Traînée hypersonique minimale ③	309
14.6 Méthodes de calcul pour les obstacles émoussés ④	312
15 Effets visqueux et couche limite	317
Rappels	317
15.1 Régime laminaire	324
15.1.1 Plaque plane : loi approchée en sinus ①	324
15.1.2 Plaque plane : loi polynomiale ③	325
15.1.3 Aspiration uniforme d'une couche limite de plaque plane ①	329
15.1.4 Mise en mouvement brusque d'une plaque plane ②	330
15.1.5 Plaque plane : relations intégrales avec soufflage/aspiration ①	332
15.1.6 Écoulement de Couette instationnaire ②	334
15.1.7 Écoulement oscillant : deuxième problème de Stokes ②	337
15.1.8 Solution de similitude avec gradient de pression : solution de Falkner et Skan ③	339
15.1.9 Écoulement laminaire dans un jet ②	343
15.2 Abscisse de transition dans une couche limite de plaque plane ②	347
15.3 Régime turbulent	349
15.3.1 Profil de vitesse turbulent : loi en puissance ③	349
15.3.2 Profil de vitesse turbulent, loi de Van Driest ②	352
15.3.3 Fluctuations turbulente en proche paroi ②	355
15.3.4 Turbulence : soufflage avec gradient de pression ①	357
15.3.5 Couche limite turbulente avec aspiration ④	358
15.3.6 Écoulement turbulent dans un jet ②	362