

TECHNOSUP

Les FILIÈRES TECHNOLOGIQUES des ENSEIGNEMENTS SUPÉRIEURS

AÉRONAUTIQUE

Dynamique du vol

Équations, équilibres, performances, qualités de vol

Laurent BOVET

ellipses

Table des matières

I	Généralités	15
1	Introduction	17
1.1	L'avion	17
1.2	Les commandes	17
1.2.1	La commande de tangage δm	18
1.2.2	La commande de roulis δl	18
1.2.3	La commande de lacet δn	19
1.2.4	La commande des gaz δx	20
2	Les repères	23
2.1	Définition des repères	23
2.1.1	Le référentiel inertiel $\mathcal{R}_i (\mathcal{C}_T, \vec{x}_i, \vec{y}_i, \vec{z}_i)$	23
2.1.2	Le repère fixe lié à la Terre $\mathcal{R}_T (\mathcal{O}, \vec{x}_T, \vec{y}_T, \vec{z}_T)$	24
2.1.3	Le repère lié à la Terre $\mathcal{R}_o (\mathcal{O}, \vec{x}_o, \vec{y}_o, \vec{z}_o)$	24
2.1.4	Le repère aérodynamique $\mathcal{R}_a (\mathcal{G}, \vec{x}_a, \vec{y}_a, \vec{z}_a)$	25
2.1.5	Le repère avion $\mathcal{R}_b (\mathcal{G}, \vec{x}_b, \vec{y}_b, \vec{z}_b)$	26
2.2	Définition des angles entre repères	27
2.2.1	Passage du repère terrestre \mathcal{R}_o au repère avion \mathcal{R}_b	27
2.2.2	Passage du repère aérodynamique \mathcal{R}_a au repère avion \mathcal{R}_b	28
2.3	Matrices de passage associées	28
2.3.1	Passage du repère terrestre \mathcal{R}_o au repère avion \mathcal{R}_b	28
2.3.2	Passage du repère avion \mathcal{R}_b au repère aérodynamique \mathcal{R}_a	29
2.3.3	Passage du repère terrestre \mathcal{R}_o au repère aérodynamique \mathcal{R}_a	30
2.4	Vitesses de rotation associées	30
2.4.1	Vitesse de rotation du repère terrestre par rapport au référentiel inertiel : $\vec{\Omega}_{\mathcal{R}_o/\mathcal{R}_i}$	30
2.4.2	Vitesse de rotation du repère avion par rapport au repère terrestre : $\vec{\Omega}_{\mathcal{R}_b/\mathcal{R}_o}$	31
2.4.3	Vitesse de rotation du repère avion par rapport au repère aérodynamique : $\vec{\Omega}_{\mathcal{R}_b/\mathcal{R}_a}$	32
3	Les modèles	35
3.1	La Terre	35
3.1.1	La gravitation	35

3.1.2	L'atmosphère	36
3.2	L'avion	38
3.2.1	Évolution de la masse totale avec le temps	38
3.2.2	Rigidité	39
3.2.3	Symétrie	39
4	Les équations cinématiques	41
4.1	Généralités	41
4.1.1	Variables d'état	41
4.1.2	Relation fondamentale de la cinématique	42
4.2	Mouvement de translation	42
4.2.1	Vitesse inertielle	42
4.2.2	Vitesse cinématique	42
4.2.3	Vitesse aérodynamique	44
4.2.4	Équations cinématiques de déplacement simplifiées	44
4.3	Mouvement de rotation	45
4.3.1	Vitesse de rotation de l'avion	45
4.3.2	Équations cinématiques de rotation	46
4.3.3	Couplage cinématique	47
5	Les forces	49
5.1	Les efforts aérodynamiques	49
5.1.1	Expression générale	49
5.1.2	Expression en fonction du Mach \mathcal{M}	52
5.1.3	Projection des forces et moments	52
5.1.4	Coefficient de portance C_z	53
5.1.5	Coefficient de traînée C_x	57
5.2	Les efforts de propulsion	60
5.2.1	Les différents types de moteur	60
5.2.2	Expression générale de la poussée	62
5.2.3	Modélisation de la consommation horaire	63
6	Les équations de la dynamique	67
6.1	Relations fondamentales de la dynamique	67
6.1.1	Accélération inertielle	67
6.1.2	Modèle terrestre simplifié	68
6.1.3	Relation fondamentale de la dynamique pour les forces	70
6.1.4	Relation fondamentale de la dynamique pour les moments	71
6.1.5	Découplage longitudinal-latéral	72
6.2	Équations dynamiques longitudinales	73
6.2.1	Équations de forces	73
6.2.2	Équation de moment	76
6.2.3	Bilan	77
6.3	Équations du vol latéral	77
6.3.1	Équation de forces	77

6.3.2	Équation de moment	79
6.3.3	Bilan	80
II	Équilibres	83
7	L'équilibre longitudinal	85
7.1	Définitions	85
7.1.1	Vol longitudinal équilibré	85
7.1.2	Pseudo-équilibre longitudinal	86
7.2	Équations longitudinales à l'équilibre	88
7.2.1	Équations de sustentation et de propulsion	88
7.2.2	Applications	90
7.3	Effet des commandes en longitudinal	94
7.3.1	Modification de l'incidence : équation de moment de tangage	94
7.3.2	Modification de la vitesse : équation de sustentation	96
7.3.3	Modification de la pente : équation de propulsion	97
7.3.4	Synthèse : accélération en palier	100
8	Stabilité statique longitudinale - centrage	101
8.1	Notion de foyer	101
8.1.1	Foyer du profil seul	101
8.1.2	Foyer de l'avion complet	104
8.2	Stabilité statique longitudinale	108
8.2.1	Notion de stabilité statique	108
8.2.2	Stabilité de l'avion complet	108
8.2.3	Stabilité vs. maniabilité	110
8.2.4	Le décrochage profond ou "Deep Stall"	111
8.3	Centrage de l'avion	114
8.3.1	Définition du centrage	114
8.3.2	Diagramme "masse-centrage"	115
9	L'équilibre latéral	117
9.1	Présentation	117
9.1.1	Hypothèses de découplage	117
9.1.2	Équations latérales à l'équilibre	117
9.1.3	Linéarisation des coefficients aérodynamiques latéraux	118
9.2	Coefficients latéraux dérivés	119
9.2.1	Coefficient de force latérale C_Y	119
9.2.2	Coefficient de moment de roulis C_l	121
9.2.3	Coefficient de moment de lacet C_n	128
9.2.4	Bilan	134
9.3	Applications	135
9.3.1	Mise en équation	135
9.3.2	Vol rectiligne dérapé	135

9.3.3	Vol rectiligne avec panne moteur : le "beta target"	137
III	Performances	139
10	Facteur de charge - grandeurs totales	141
10.1	Facteur de charge	141
10.1.1	Définition	141
10.1.2	Facteur de charge longitudinal et vertical	142
10.1.3	Facteur de charge transversal	144
10.1.4	Applications	145
10.2	Grandeurs totales	148
10.2.1	Énergie totale	148
10.2.2	Hauteur totale	149
10.2.3	Vitesse ascensionnelle totale	150
10.2.4	Pente totale	150
10.2.5	Application : la Visualisation Tête Haute (VTH)	150
11	La montée et la descente	153
11.1	Rappel	153
11.2	Performances en montée : l'avion à réaction	154
11.2.1	Montée à pente maximale	155
11.2.2	Montée à vitesse ascensionnelle maximale	156
11.3	Performances en descente : le planeur	158
11.3.1	Maximisation de la distance franchissable	159
11.3.2	Maximisation de l'endurance	160
12	La croisière	163
12.1	Les performances en croisière	163
12.1.1	L'endurance	163
12.1.2	La distance franchissable	164
12.1.3	Équations de la croisière	164
12.1.4	Les différents types de croisière	165
12.1.5	Lois de pilotage des différentes croisières	166
12.1.6	Performances des différentes croisières	167
12.2	Optimisation de la croisière	169
12.2.1	Maximisation de l'endurance	170
12.2.2	Maximisation de la distance franchissable	171
12.3	Formules de Bréguet	174
12.3.1	Endurance	174
12.3.2	Distance franchissable	175
13	Le domaine de vol	177
13.1	Généralités	177
13.1.1	Présentation	177
13.1.2	Abaque de Chevalier	178

13.2	Plafond de sustentation	179
13.2.1	Définition	179
13.2.2	Détermination de la limite de sustentation pour un avion de ligne	180
13.3	Plafond de propulsion	183
13.3.1	Définition	183
13.3.2	Détermination de la limite de propulsion pour un avion de ligne	183
13.4	La limite structurale	186
13.4.1	Limitation en vitesse	186
13.4.2	Limite en altitude	187
13.5	La limite thermique	188
13.6	Synthèse	188
14	Le virage	191
14.1	Généralités	191
14.1.1	Modification de la trajectoire dans le plan : types de virage . .	191
14.1.2	Pilotage du virage	193
14.2	Mise en équation	195
14.2.1	Hypothèses simplificatrices	195
14.2.2	Équilibre en virage	195
14.2.3	Facteur de charge vertical	197
14.2.4	Taux et rayon de virage	200
14.3	Limitations en virage	202
14.3.1	Limite de manoeuvre	202
14.3.2	Marge de manoeuvre	204
14.3.3	Limitation structurale	211
14.4	Performances en virage	212
14.4.1	Taux de virage maximal	212
14.4.2	Rayon de virage minimal	214
14.5	Synthèse : domaine de manoeuvrabilité	215
IV	Qualités de vol	219
15	Introduction aux qualités de vol	221
15.1	Généralités	221
15.2	Analyse de la dynamique	222
15.2.1	Mise en équations	223
15.2.2	Linéarisation des équations	224
15.2.3	Analyse des modes propres	225
15.3	Application : dynamique longitudinale d'un avion de transport	228
15.3.1	Représentation d'état linéarisée - diagonalisation	228
15.3.2	Analyse des modes	229
15.3.3	Réponse temporelle du système	230

16 La dynamique longitudinale	233
16.1 Rappels - linéarisation	233
16.1.1 Vol longitudinal pur - équations longitudinales	233
16.1.2 Représentation d'état linéarisée	233
16.2 Approche physique de la dynamique longitudinale	235
16.2.1 Effet du manche en tangage	235
16.2.2 Effet des gaz	237
16.3 Étude analytique des modes	238
16.3.1 Mode "oscillation d'incidence"	238
16.3.2 Stabilité dynamique - point de manoeuvre	240
16.3.3 Mode "phugoïde"	242
16.3.4 Mode "rappel de propulsion"	245
17 La dynamique latérale	247
17.1 Rappels - linéarisation	247
17.1.1 Hypothèses de découplage - équations latérales	247
17.1.2 Représentation d'état linéarisée	248
17.2 Les modes latéraux	249
17.2.1 Présentation des modes latéraux	249
17.2.2 Conditions de découplage des mouvements de roulis et de lacet	249
17.2.3 Mode "roulis pur"	251
17.2.4 Mode "oscillation de dérapage"	252
17.2.5 Mode "spiral"	257
V Annexes	263
A Modélisation de l'atmosphère	265
A.1 Loi de Laplace	265
A.2 Modèle simplifié : approximation exponentielle	266
B Accélération d'inertie	267
B.1 Expression des accélérations de Coriolis et d'entraînement	267
B.1.1 Calcul de la vitesse inertielle	267
B.1.2 Calcul de l'accélération inertielle	268
B.2 Application au vol en croisière	270
C Optimisation de la vitesse ascensionnelle V_z	273
C.1 Expression analytique du C_z optimal	273
C.2 Vérification numérique	275
D Compléments d'anémométrie	277
D.1 Mesure de la vitesse	277
D.1.1 Principe de fonctionnement du tube Pitot	277
D.1.2 Calcul de la vitesse conventionnelle et de la vitesse aérodynamique	278
D.2 Conversion de la vitesse conventionnelle en vitesse aérodynamique	279

D.2.1	Programme Matlab	280
E	Compléments sur la marge de manœuvre	285
E.1	Comparaison des vitesses caractéristiques sur la marge de manœuvre .	285
E.2	Comparaison des taux de virage	286
E.2.1	Taux de virage à V_m^R	286
E.2.2	Taux de virage à V_m^{nz}	287
E.2.3	Bilan	288
F	Linéarisation des équations du mouvement	289
F.1	Linéarisation des équations longitudinales	289
F.1.1	Matrice d'état longitudinale	289
F.1.2	Calcul des coefficients de la matrice A_L	290
F.1.3	Hypothèses simplificatrices	293
F.1.4	Simplification des coefficients	294
F.1.5	Bilan	296
F.2	Linéarisation des équations latérales	297
F.2.1	Matrice d'état latérale	297
F.2.2	Calculs des coefficients de la matrice A_l	297
F.2.3	Bilan	299

Généralités