Département de Génie Mécanique - Option Aéronautique

Conception et fabrication d'un Drone à Voilure Fixe pour Missions de Surveillance

Réalisé par

ENNIBAN Moadh

GARMOUM Mohammed

RAHMANI Abderrahman

YAZIDI Hamza

Encadré par

M.AIT ALI Mohamed El Amine

Année Académique 2025/2026

Table des matières

Table des matières i

Table des figures ix

Liste des tableaux xii

I État de l'art 1

I.1 Étude Bibliographique . . . 1

I.1.1 Introduction . . . 1

I.1.2 L'histoire des drones . . . 1

I.2 Classification des Drones . . . 4

I.2.1 Selon le nombre d'hélices . . . 4

I.2.2 Selon les fonctions . . . 5

II Introduction et Cahier des Charges 6

II.1 Contexte Général des Drones à Voilure Fixe . . . 6

II.2 Motivation du Projet . . . 7

II.3 Problématique et Enjeux . . . 8

II.4 Objectifs du Projet . . . 9

II.5 Présentation Générale du Drone . . . 9

II.5.1 Classification des Drones à Voilure Fixe . . . 9

II.5.2 Architecture Générale du Drone . . . 10

II.5.3 Description des Principaux Sous-systèmes . . . 11

II.6 Cahier des Charges Fonctionnel . . . 12

II.6.1 Profil de Mission . . . 12

II.6.2 Cahier des Charges Fonctionnel . . . 13

II.7 Contraintes et Hypothèses de Conception . . . 13

III Dimensionnement et Étude Aérodynamique 14

III.1 Introduction au Dimensionnement Préliminaire . . . 14

III.1.1 Cahier des Charges Fonctionnel . . . 14

III.1.2 Contexte et Objectifs . . . 15

III.1.3 Spécifications de Performance . . . 15

III.2 Méthodologie Générale de Dimensionnement . . . 15

III.2.1 Estimation de la Masse Maximale au Décollage . . . 15

III.2.2 Détermination de la Surface Ailaire et de la Puissance Moteur 18

III.2.3 Méthodologie de Conception par Diagramme d'Appariement . 22

III.2.4 Estimation des Paramètres Aérodynamiques . . . 23

III.2.5 Calcul des Performances à partir du Point Optimal . . . 24

III.2.6 Algorithme de Tracé des Courbes et Détermination du Point Optimal . . . 26
III.3 Algorithme de Calcul Préliminaire . . . 28
III.3.1 Structure Générale de l'Algorithme . . . 28
III.3.2 Paramètres d'Entrée . . . 29
III.3.3 Paramètres de Sortie . . . 30

IV Dimensionnement de l'Aile 32
IV.1 Sélection de la Position Verticale de l'Aile . . . 32
IV.1.1 Introduction et Contexte . . . 32
IV.1.2 Analyse Comparative des Configurations . . . 33
IV.1.3 Matrice de Décision pour la Sélection . . . 33
IV.1.4 Conclusion et Sélection Finale . . . 34
IV.2 Sélection du Profil de l'Aile et Performances Aérodynamiques . . . 34
IV.2.1 Introduction et Justification du Choix . . . 34
IV.2.2 Caractéristiques Géométriques du Profil NACA 4418 . . . 34
IV.2.3 Détermination du Centre Aérodynamique . . . 35
IV.2.4 Analyse des Performances Aérodynamiques . . . 36
IV.2.5 Caractéristiques Géométriques Finales du Profil NACA 4418 . 38
IV.3 Détermination de l'Incidence de l'Aile . . . 38
IV.3.1 Introduction . . . 38
IV.3.2 Valeurs Typiques pour les Drones de Surveillance . . . 38
IV.3.3 Analyse des Options d'Incidence . . . 39
IV.3.4 Calcul de l'Incidence Théorique . . . 39
IV.3.5 Décision Finale et Recommandation . . . 39
IV.4 Rapport de Conicité . . . 40
IV.4.1 Introduction . . . 40
IV.4.2 Choix du Rapport de Conicité . . . 41
IV.5 Angle de Balayage . . . 41
IV.5.1 Introduction . . . 41
IV.5.2 Choix de l'Angle de Balayage . . . 42
IV.6 Angle Dièdre . . . 43
IV.6.1 Introduction et Contexte . . . 43
IV.6.2 Analyse des Drones UAV Existants . . . 44
IV.6.3 Effet du Dièdre sur la Stabilité Latérale . . . 44
IV.6.4 Choix de l'Angle Dièdre . . . 45
IV.7 Synthèse des Paramètres de Dimensionnement de l'Aile . . . 45
IV.7.1 Tableau Récapitulatif . . . 46
IV.7.2 Justification des Choix de Conception . . . 46

IV.7.3 Conclusion 47

V Dimensionnement de l'Empennage 47

V.1 Introduction et Contexte du Dimensionnement 47
V.1.1 Objectifs de la Conception 47
V.1.2 Paramètres de l'Aile de Référence 48
V.2 Sélection de la Configuration de l'Empennage 48
V.2.1 Configurations Disponibles 48
V.2.2 Sélection des Configurations à Évaluer 49
V.2.3 Analyse des Drones UAV Existants 50
V.2.4 Matrice de Décision pour la Sélection 50
V.3 Dimensionnement de l'Empennage Horizontal 51
V.3.1 Sélection du Coefficient de Volume Horizontal 51
V.3.2 Détermination du Bras de Levier Optimal 51
V.3.3 Calcul de la Surface de l'Empennage Horizontal 54
V.3.4 Calcul du Coefficient de Portance Requis 54
V.3.5 Paramètres Géométriques de l'Empennage Horizontal 56
V.4 Conclusion et Synthèse 61
V.5 Calcul de Géométrie de l'Empennage Verticale 62
V.5.1 Sélection du Coefficient de Volume Vertical 62
V.5.2 Détermination du Bras de levier 63
V.5.3 Calcul de la Surface de l'Empennage Vertical 64
V.5.4 Paramètres Geometrie de l'empennage Verticale 64
V.5.5 Conclusion et Synthèse 66

VI Étude Aérodynamique 67

VI.1 Équations Fondamentales de la Dynamique de Vol 67
VI.1.1 Introduction et Hypothèses 67
VI.1.2 Systèmes de Référence 68
VI.1.3 Équations du Mouvement 68
VI.1.4 Angles d'Euler et Relations Cinématiques 69
VI.1.5 Paramètres de Vol Adimensionnels 70
VI.2 Calcul des Forces Aérodynamiques et Moments 70
VI.2.1 Modélisation des Forces Aérodynamiques 70
VI.2.2 Coefficient de Portance Total 71
VI.2.3 Coefficient de Traînée Total 71
VI.2.4 Calcul des Moments Aérodynamiques 72

VII Analyse de la Stabilité Statique 73

VII.1 Introduction à la Stabilité Statique 73
VII.2 Stabilité Statique Longitudinale 74

VII.2.1 Critère Fondamental . . . 74
VII.2.2 Marge Statique . . . 75
VII.2.3 Corde Aérodynamique Moyenne . . . 75
VII.2.4 Angle de Downwash et son Gradient . . . 76
VII.2.5 Calcul du Point Neutre . . . 76
VII.3 Stabilité Statique Directionnelle . . . 77
VII.3.1 Critère Fondamental . . . 77
VII.3.2 Contribution de la Dérive . . . 77
VII.3.3 Effet Dièdre . . . 78
VII.4 Conditions de Stabilité Statique Complète . . . 78

VIII Analyse de la Stabilité Dynamique 79
VIII.1 Introduction à la Stabilité Dynamique . . . 79
VIII.2 Formulation Mathématique Générale . . . 79
VIII.3 Stabilité Longitudinale . . . 80
VIII.3.1 Équations du Mouvement Longitudinal . . . 80
VIII.3.2 Mode Court Période . . . 80
VIII.3.3 Mode Phugoïde . . . 81
VIII.4 Stabilité Latérale/Directionnelle . . . 81
VIII.4.1 Équations du Mouvement Latéral/Directionnel . . . 81
VIII.4.2 Mode de Roulis . . . 82
VIII.4.3 Mode Spiral . . . 82
VIII.4.4 Mode Roulis Hollandais . . . 82

IX Simulation, Modélisation et Conception 83
IX.1 Présentation du Logiciel XFLR5 . . . 83
IX.1.1 Introduction à XFLR5 . . . 83
IX.1.2 Objectifs et Champ d'Application . . . 84
IX.1.3 Fonctionnalités Principales . . . 84
IX.1.4 Analyse des Ailes (3D) . . . 85
IX.1.5 Analyse d'un Avion Complet . . . 86
IX.1.6 Avantages et Limites du Logiciel . . . 87
IX.2 Simulation Aérodynamique du Profil . . . 87
IX.2.1 Analyse des Graphiques Aérodynamiques . . . 87
IX.2.2 Synthèse de l'Analyse du Profil . . . 90
IX.3 Simulation de l'Aile et du Drone Complet . . . 90
IX.3.1 Analyse de la Distribution de Portance . . . 90
IX.3.2 Visualisation des Tourbillons Marginaux . . . 91
IX.3.3 Champ Vectoriel Aérodynamique . . . 92
IX.3.4 Configuration Complète et Stabilité . . . 93

IX.3.5 Synthèse des Performances Globales . . . 94
IX.4 Analyse de la Stabilité sur XFLR5 . . . 94
IX.4.1 Résultats de la Stabilité Statique sur XFLR5 . . . 94
IX.4.2 Résultats de la Stabilité Dynamique . . . 96
IX.4.3 Conclusion sur la Stabilité . . . 100
IX.5 Dimensionnement des Surfaces de Contrôle . . . 100
IX.5.1 Introduction au Dimensionnement . . . 100
IX.5.2 Ailerons . . . 101
IX.5.3 Gouverne de Profondeur . . . 104
IX.5.4 Gouverne de direction . . . 107
IX.6 Conception Mécanique sous CATIA V5 . . . 109
IX.6.1 Méthodologie de Conception CAO . . . 109
IX.6.2 Modélisation des Pièces Principales . . . 109
IX.6.3 Assemblage Général et Géométrie Finale du Drone . . . 112

X Modéle Dynmaique 113
X.1 Introduction et Contexte . . . 113
X.2 Formulation Mathématique du Modèle Dynamique . . . 114
X.2.1 Équations du Mouvement à 6 Degrés de Liberté . . . 114
X.2.2 Équations de Translation . . . 115
X.2.3 Équations de Rotation . . . 115
X.2.4 Cinématique des Angles d'Euler . . . 116
X.2.5 Équations de Position . . . 116
X.2.6 Paramètres Géométriques et Inertiels . . . 116
X.3 Algorithmes de Calcul des Grandeurs Aérodynamiques . . . 117
X.3.1 Calcul des Angles Aérodynamiques . . . 117
X.3.2 Calcul des Coefficients Aérodynamiques . . . 117
X.3.3 Calcul des Moments d'Amortissement . . . 121
X.3.4 Calcul des Forces et Moments de Commande . . . 122
X.3.5 Calcul des Forces de Gravité et de Poussée . . . 122

XI Architecture du Modèle Simulink 123
XI.1 Vue d'Ensemble du Modèle . . . 123
XI.2 Bloc des Forces et Moments Aérodynamiques . . . 123
XI.2.1 Forces Aérodynamiques . . . 124
XI.2.2 Moments Aérodynamiques . . . 124
XI.3 Bloc des Équations du Mouvement (6DOF) . . . 125
XI.3.1 Paramètres de Configuration . . . 125

XII Connexion MATLAB/Simulink avec FlightGear pour Visualisation en Temps Réel 126

XII.1 Architecture de Connexion 126
XII.2 Transformation des Coordonnées pour FlightGear 126
XII.2.1 Équations de Navigation 126
XII.2.2 Calcul des Coordonnées Géodésiques 127
XII.3 Blocs Simulink pour l'Interface FlightGear 127
XII.3.1 Bloc de Génération du Script d'Exécution 128
XII.3.2 Bloc d'Animation Préconfigurée 6DoF 129
XII.4 Préparation de la Géométrie 3D 129

XIII Théorie de la Commande Optimale LQR 131
XIII.1 Problème de Régulation Linéaire Quadratique 131
XIII.1.1 Formulation du Problème 131
XIII.1.2 Interprétation Physique 132
XIII.2 Solution du Problème LQR 132
XIII.2.1 Théorème Fondamental 132
XIII.2.2 Équation Algébrique de Riccati 132
XIII.2.3 Propriétés Fondamentales 133

XIV Définition du Système et Modélisation 133
XIV.1 Variables d'État 134
XIV.2 Variables de Contrôle 134
XIV.3 Linéarisation autour du Point d'Équilibre 135
XIV.3.1 Condition de Vol en Équilibre 135
XIV.3.2 Perturbations et Linéarisation 135
XIV.3.3 Linéarisation des Forces et Moments 136
XIV.4 Dérivées de Stabilité et de Contrôle 136
XIV.4.1 Signification Physique 136
XIV.4.2 Dérivées de Stabilité 136
XIV.4.3 Dérivées de Contrôle 137
XIV.5 Équations d'État Linéarisées 137
XIV.5.1 Forme Générale 137
XIV.5.2 Représentation Matricielle 137
XIV.6 Application Numérique et Paramétrage 138
XIV.6.1 Paramètres du Drone 138
XIV.6.2 Calcul des Éléments Matriciels 139
XIV.6.3 Matrices Finales du Système Linéarisé 139
XIV.7 Choix des Matrices de Pondération 139
XIV.8 Application au Contrôle Longitudinal 140
XIV.9 Modélisation et Simulation des Phases de Vol 140
XIV.9.1 Introduction aux Phases de Vol 140

XIV.9.2 Description des Phases de Vol . . . 141
XIV.9.3 Analyse des Performances en Vol . . . 141
XIV.9.4 Attitude et Contrôle d'Orientation . . . 143
XIV.9.5 Forces et Moments Aérodynamiques . . . 145
XIV.9.6 Angles Aérodynamiques . . . 147
XIV.9.7 Synthèse des Performances . . . 148

XV Fabrication et Essais d'un Drone à Voilure Fixe 148
XV.1 Procédés de Fabrication . . . 148
XV.1.1 Découpe au Fil Chaud . . . 148
XV.2 Assemblage et Intégration des Systèmes . . . 150
XV.2.1 Assemblage Structurel Principal . . . 150
XV.2.2 Intégration du Système de Propulsion . . . 150
XV.2.3 Intégration de l'Électronique de Contrôle . . . 151
XV.2.4 Installation de la Batterie et Centrage . . . 151
XV.3 Phase d'Essais . . . 151
XV.3.1 Préparation et Vérifications . . . 151
XV.3.2 Essais au Sol . . . 151
XV.3.3 Premier Vol - Phase de Lancement . . . 152
XV.3.4 Incident et Crash . . . 153
XV.4 Analyse de Défaillance . . . 153
XV.4.1 Méthodologie d'Investigation (Approche 5M) . . . 153
XV.4.2 Analyse AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance) . . . 153
XV.4.3 Reconstruction de l'Incident . . . 154
XV.5 Conclusions et Recommandations . . . 154
XV.5.1 Bilan du Projet . . . 154
XV.5.2 Recommandations pour Version 2.0 . . . 154
XV.5.3 Conclusion Générale . . . 155

XVI Perspectives et Améliorations Futures 155
XVI.1 Améliorations du Modèle Dynamique . . . 155
XVI.1.1 Simulation Hors Soufflerie . . . 155
XVI.1.2 Développement d'un Modèle Réduit de Vol . . . 156
XVI.1.3 Extension du Domaine de Simulation . . . 156
XVI.2 Perspectives de Contrôle et d'Automatisation . . . 156
XVI.2.1 Amélioration des Algorithmes de Contrôle . . . 157
XVI.2.2 Intégration de Fonctionnalités Autonomes . . . 157
XVI.3 Perspectives Structurelles et Matériaux . . . 157
XVI.3.1 Optimisation Structurelle . . . 157
XVI.3.2 Nouveaux Matériaux . . . 158

XVI.4 Perspectives Environnementales et Énergétiques 158
XVI.4.1 Amélioration de l'Efficacité Énergétique 158
XVI.4.2 Réduction de l'Impact Environnemental 158
XVI.5 Roadmap de Développement 159

XVII Conclusion Générale **159**
XVII.1 Synthèse des Réalisations 159
XVII.1.1 Acquis Théoriques et Numériques 159
XVII.1.2 Acquis Pratiques 160
XVII.2 Contributions du Projet 160
XVII.2.1 Contribution à la Formation Ingénieur 160
XVII.2.2 Contribution Méthodologique 160
XVII.3 Limites et Enseignements 160
XVII.3.1 Limites Identifiées 161
XVII.3.2 Enseignements Clés 161
XVII.4 Perspectives et Ouvertures 161
XVII.4.1 Perspectives Académiques 161
XVII.4.2 Perspectives Professionnelles 161
XVII.5 Message Final 162

Table des figures

1 Kettering Bug (à gauche) et Aerial Target (à droite) 2
2 Drone Denny 1 3
3 AR Drone 3
5 Enter Caption 4
4 Les différents nombres d'hélices 4
6 Classification selon le nombre d'hélices 5
7 Drones à ailes fixes et battantes 5
8 Architecture typique d'un drone à voilure fixe 7
9 Classification et positionnement du drone développée 10
10 Décomposition en sous-systèmes principaux 11
11 Profil de mission type du drone de surveillance 12
12 Diagramme d'appariement typique pour un drone UAV montrant les contraintes de performance et la région acceptable (zone verte). Le point optimal est situé à l'intersection qui maximise W/P (minimise la puissance). 23
13 Les quatre positions verticales de l'aile possibles 32
14 Paramètres géométriques du profil de l'aile 35
15 Coefficient de portance C_L en fonction de l'angle d'attaque α pour différentes vitesses 37
16 Coefficient de traînée C_D en fonction de l'angle d'attaque α pour différentes vitesses 37
17 Coefficient de moment C_M en fonction de l'angle d'attaque α pour différentes vitesses 37
18 Polaire du profil : C_L en fonction de C_D pour différentes vitesses 37
19 Angle d'incidence de l'aile 38
20 Ailes avec différents rapports de conicité : (a) Rectangulaire ($\lambda = 1$) ; (b) Trapézoïdale ($0 < \lambda < 1$) ; (c) Triangulaire (delta) ($\lambda = 0$) 40
21 Définition de l'angle de balayage sur une aile d'avion 42
22 Définition de l'angle dièdre : (a) Dièdre positif ; (b) Anèdre (dièdre négatif) 43
23 Effet du dièdre sur la distribution de portance et le moment de roulis . . 45
24 Les huit configurations principales d'empennage pour drones UAV 49
25 Vue de dessus de la partie arrière de l'avion 52
26 Variation de la surface mouillée en fonction du bras de l'empennage . . . 53
27 Forces et moments agissant sur un avion conventionnel en équilibre longitudinal 55
28 Envergure de l'empennage et sillage de l'hélice 57
29 Systèmes de Repère inertiel et Repère lié au corps 68
30 Principe de stabilité statique 74
31 Moment de l'aéronef 75

32 Schéma de l'effet de downwash sur l'empennage horizontal 76
33 Marge statique 77
34 Le dièdre est une source puissante de stabilité latérale sur un avion . . . 78
35 Système masse-ressort-amortisseur 79
36 Logo XFLR5 84
37 Géometrie de profile de l'aile 85
38 Analyse des polaires aérodynamiques dans XFLR5 85
39 Modélisation 3D de l'aile dans XFLR5 86
40 Configuration complète du drone dans XFLR5 87
41 Évolution du coefficient de portance C_L en fonction de l'angle d'attaque α 88
42 Polaire de traînée : C_L en fonction de C_D 89
43 Finesse aérodynamique C_L/C_D en fonction de α 90
44 Distribution de pression et de portance sur l'aile 91
45 Lignes de courant et tourbillons marginaux aux extrémités d'aile 92
46 Champ vectoriel des forces aérodynamiques sur l'aile 93
47 Localisation du point de référence des moments aérodynamiques 93
48 Variation du coefficient de moment de tangage C_m en fonction de l'angle d'attaque α 94
49 Variation du coefficient de moment de roulis C_l en fonction de l'angle de dérapage β 95
50 Variation du coefficient de moment de lacet C_n en fonction de l'angle de dérapage β 96
51 Réponse temporelle de la vitesse longitudinale u (m/s) pour α constant. . 97
52 Réponse temporelle de la vitesse verticale w (m/s) pour α constant. . . . 97
53 Réponse temporelle de la vitesse de tangage q (°/s) pour α constant. . . 98
54 Réponse temporelle de l'angle de tangage θ (°) pour α constant. 98
55 Réponse temporelle de la vitesse latérale v (m/s) pour β constant. 99
56 Réponse temporelle de la vitesse de roulis p (°/s) pour β constant. 99
57 Réponse temporelle de la vitesse de lacet r (°/s) pour β constant. 100
58 Réponse temporelle de l'angle de roulis ϕ (°) pour β constant. 100
59 Modélisation de l'aile sous CATIA V5 110
60 Modélisation du fuselage sous CATIA V5 110
61 Modélisation de l'empennage horizontale sous CATIA V5 111
62 Modélisation de l'empennage verticale sous CATIA V5 111
63 Vue isométrique de l'assemblage complet du drone 112
64 Vue de dessus du drone assemblé 113
65 Repères de référence : repère corps (X_b, Y_b, Z_b) et repère inertiel Terre (X_e, Y_e, Z_e) 114
66 Bloc Simulink des Forces et Moments Aérodynamiques 123

67 Bloc Simulink des Équations du Mouvement (6DOF) 125
68 Logo de FlightGear 126
69 Bloc "Generate Run Script" pour créer le script d'exécution FlightGear . 128
70 Bloc "FlightGear Preconfigured 6DoF Animation" 129
71 Processus de préparation de la géométrie 3D pour FlightGear 130
72 Logo de Logiciel ac3D 130
73 Vues multiples du drone UAV dans FlightGear 131
74 Architecture du système de contrôle LQR pour le mouvement longitudinal 133
75 Systèmes de coordonnées et définition des paramètres du drone à aile fixe. 134
76 Système de contrôle de tangage du drone à aile fixe. 135
77 Vitesses du drone dans les différentes phases de vol. 142
78 Positions du drone 143
79 Angles d'Euler du drone. 144
80 Vitesses angulaires du drone. 145
81 Forces aérodynamiques sur le drone. 146
82 Moments aérodynamiques sur le drone. 147
83 Angles aérodynamiques du drone. 148
84 Aile couper au fil chaud 149
85 Assemblage des ailes et fuselage 150
86 Phase d'accélération du lancement manuel 152
87 Phase de décollage après lancement 152

Liste des tableaux

1 Principaux enjeux et défis du projet 8
2 Objectifs principaux du projet 9
3 Cahier des charges fonctionnel détaillé 13
4 Contraintes et hypothèses de conception 14
5 Valeurs typiques de $C_{L_{max}}$ pour différents profils 19
6 Valeurs typiques de finesse maximale pour drones 20
7 Valeurs de densité relative à différentes altitudes 22
8 Valeurs typiques de C_{D_0} pour drones 23
9 Paramètres d'entrée de l'algorithme de dimensionnement 27
10 Définition des régions acceptables pour chaque contrainte 28
11 Paramètres d'entrée complets de l'algorithme 29
12 Paramètres de sortie de l'algorithme - Résultats pour notre drone 32
13 Avantages et inconvénients des différentes positions verticales d'aile . . . 33
14 Matrice de décision pour la sélection de la position verticale 33
15 Performances aérodynamiques du profil NACA 4418 37
16 Caractéristiques géométriques complètes du profil NACA 4418 38
17 Valeurs d'incidence typiques pour drones de surveillance 39
18 Analyse comparative des options d'incidence 39
19 Spécifications finales de l'incidence 40
20 Angles dièdres de drones UAV de surveillance existants 44
21 Synthèse complète des paramètres de conception de l'aile 46
22 Justification synthétique des choix de conception 47
23 Paramètres de l'aile pour le dimensionnement de l'empennage 48
24 Configurations d'empennage horizontal pour drones UAV 50
25 Configurations d'empennage de drones UAV de surveillance existants . . 50
26 Matrice de décision pour la sélection de la configuration 50
27 Coefficients de volume horizontal typiques pour drones UAV 51
28 Taux d'effilement d'empennage horizontal de drones UAV de surveillance 59
29 Synthèse des paramètres de l'empennage horizontal 62
30 Comparaison des coefficients de volume vertical $\overline{V_V}$ pour différents UAV . 62
31 Taux d'effilement de la dérive verticale (λ_v) de drones UAV de surveillance 65
32 Synthèse des paramètres de l'empennage vertical 67
33 Systèmes de référence pour la dynamique de vol 68
34 Coefficients aérodynamiques adimensionnels 70
35 Avantages et limites de XFLR5 87
36 Caractéristiques aérodynamiques du profil NACA 4418 90
37 Synthèse des résultats de stabilité statique sur XFLR5 96

38 Paramètres de dimensionnement des ailerons . . . 101
39 Nomenclature pour le dimensionnement des ailerons . . . 101
40 Paramètres géométriques et inertiels du drone UAV . . . 116
41 Coefficients pour le calcul du coefficient de traînée C_D . . . 117
42 Coefficients pour le calcul du coefficient de force latérale C_Y . . . 118
43 Formules de calcul du coefficient de portance $C_L(\alpha)$ par intervalle . . . 118
44 Coefficients du coefficient de portance C_L par intervalle d'angle d'attaque 119
45 Points d'interpolation linéaire pour C_L dans l'intervalle $[-10°, 13°]$ . . . 119
46 Coefficients pour le calcul du coefficient de moment de roulis C_l . . . 120
47 Coefficients pour le calcul du coefficient de moment de tangage C_m . . . 120
48 Coefficients pour le calcul du coefficient de moment de lacet C_n . . . 120
49 Intervalles de calcul des coefficients aérodynamiques . . . 121
50 Caractéristiques des surfaces de contrôle . . . 122
51 Configuration du bloc 6DOF . . . 125
52 Configuration du bloc "Generate Run Script" . . . 128
53 Formats de fichiers pour la géométrie FlightGear . . . 130
54 Variables d'état longitudinales . . . 134
55 Variables de contrôle . . . 135
56 Valeurs d'équilibre . . . 135
57 Forces et moments aérodynamiques . . . 136
58 Formules des dérivées de stabilité . . . 137
59 Formules des dérivées de contrôle . . . 137
60 Caractéristiques physiques et conditions de vol . . . 138
61 Constantes calculées pour la modélisation . . . 139
62 Excursions maximales pour le contrôle longitudinal . . . 140
63 Caractéristiques des trois phases de vol . . . 141
64 Synthèse complète des performances par phase de vol . . . 148
65 Paramètres de découpe utilisés . . . 149
66 Configuration des servomoteurs . . . 151
67 Analyse des scénarios de défaillance . . . 153
68 Analyse systémique des défaillances . . . 153
69 Évaluation des risques par élément . . . 153
70 Extensions possibles du modèle dynamique . . . 156
71 Fonctionnalités autonomes à intégrer . . . 157
72 Matériaux avancés pour applications futures . . . 158
73 Feuille de route pour les développements futurs . . . 159
74 Synthèse des compétences mobilisées . . . 160