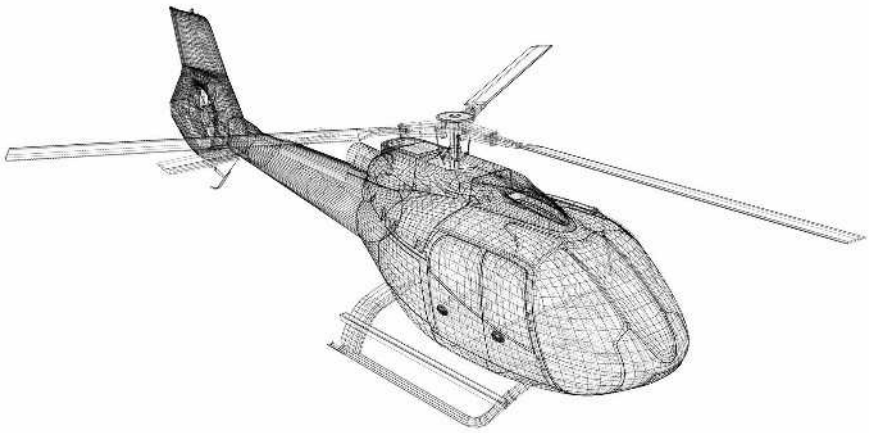
Pierre Rougier

Mécanique du vol de l'hélicoptère

2e édition



Lavoisier
hermes

Pierre Rougier

Mécanique du vol de l'hélicoptère

2e édition

Lavoisier
hermes

editions.lavoisier.fr

Direction éditoriale : Emmanuel Leclerc
Édition : Céline Poiteaux
Fabrication : Estelle Perez
Composition et couverture : Nord-Compo, Villeneuve d'Ascq
Image de couverture : podsolnykh – Fotolia.com

© 2015, Lavoisier, Paris
ISBN : 978-2-7462-4694-2

Avant-propos

Cette deuxième édition de *Mécanique du vol de l'hélicoptère* a bénéficié de l'expérience acquise par l'auteur à l'occasion de l'enseignement de cette discipline à Airbus helicopters, à l'École du personnel navigant d'essais et de réception (EPNER) d'Istres et à l'ISAé de Toulouse (Master spécialisé « hélicoptères »).

Les modèles théoriques les plus simples ont été choisis pour exposer les aspects essentiels de la mécanique du vol avec le souci constant d'en dire suffisamment pour permettre la préparation, la réalisation et l'analyse d'essais en vol pertinents mais pas trop pour ne pas dérouter un lecteur peu accoutumé aux modèles mathématiques complexes, car ce n'est pas son métier. Ce cours s'adresse donc aux ingénieurs et pilotes d'essais en charge de l'expérimentation et de la mise au point des prototypes.

Dans une première partie, sont exposés les points essentiels de la dynamique du rotor d'hélicoptère. Pour ce faire, l'étude est fondée sur le concept du moyeu rotor articulé tel qu'il a été réalisé pour la première fois par le pionnier Juan de la Cierva. Dans ce concept, la pale est reliée au moyeu par une articulation de battement et une articulation de traînée. De plus, elle est munie d'une articulation de pas. Cette modélisation permet, dans certaines limites, une extrapolation à l'étude de moyeux où les articulations de battement et de traînée sont remplacées par des « attaches souples » (moyeux dits « rigides »).

La deuxième partie est consacrée à l'étude des performances. Pour ce qui concerne le vol stationnaire, on a adopté la théorie de l'élément de pale. Cette théorie, héritière des méthodes de calcul d'hélices d'avion des années 1930 a fait l'objet de la part des hélicoptéristes de nombreux perfectionnements. Aujourd'hui, elle fournit des résultats très réalistes et tout à fait satisfaisants pour les applications industrielles.

Pour les performances en vol d'avancement en palier, en montée et en descente avec ou sans puissance, la situation est tout autre et on ne dispose pas, à ce jour de théorie simple, comparable à celle de l'élément de pale pour le vol stationnaire. C'est pourquoi, on utilise une méthode globale basée sur le bilan de l'énergie dépensée pour assurer les différentes fonctions du rotor. Un ajustement de certaines constantes empiriques est indispensable si l'on veut utiliser valablement la méthode.

La troisième partie concerne les qualités de vol. Pour l'étude de la stabilité et de la maniabilité, on fait l'hypothèse que l'hélicoptère se comporte, à la suite d'une action

du pilote sur les commandes, comme un système du premier ordre. Les équipages d'essais peuvent de la sorte fournir aux équipes de développement les sensibilités de commande et les valeurs d'amortissement souhaitables pour un contrôle satisfaisant de la machine. Enfin, l'étude des vibrations commence, elle, par la description des sources d'excitation, suivie d'un exposé des méthodes d'analyse et des dispositifs aptes à réduire le niveau vibratoire auquel sont soumis les occupants de la cabine et les différents équipements de mission.

Pour conclure, dans un dernier chapitre, les plus récentes innovations développées par les constructeurs, « leaders » du secteur sont présentées et servent d'exercices d'application aux méthodes de calcul de performance exposées précédemment.

De nombreux ingénieurs et pilotes d'essais ont contribué à l'élaboration de ce cours, tout particulièrement, les spécialistes d'essais en vol d'Airbus helicopters, de l'EPNER et de Guimbal hélicoptères qui ont, par leurs critiques et suggestions, permis d'en améliorer la rédaction. Mes plus sincères remerciements s'adressent à tous ainsi qu'à Claire Rougier qui a assuré la mise en œuvre des différents logiciels nécessaires à l'élaboration du texte.

Pierre Rougier

Table des matières

Avant-propos III

Chapitre 1
Introduction

1. Rappel historique 1

2. Vol d'avancement et moyeu articulé 3

3. Pas collectif et variation cyclique de pas 5

Chapitre 2
Dynamique du rotor

1. Mouvement de battement 9

2. Rotors rigides 17

3. Couplage pas-battement – « Liaison k » ou *delta three effect* 18

4. Mouvement de traînée 20

5. Résonance sol 24

6. Vol d'avancement et moyeu articulé 27

6.1. Cas particulier des faibles vitesses d'avancement 31
6.2. Cas des fortes vitesses 32
6.3. Bosse de manche 34
6.4. Basculement latéral du disque dû à la conicité 35
6.5. Cercle d'inversion 36
6.6. Décrochage de pale reculante 36
6.7. VNE (*velocity never exceed*) 38

7. Virage, facteur de charge et décrochage rotor 39

7.1. Équilibre de l'hélicoptère en virage stabilisé 39
7.2. Marge de manœuvre 40
7.3. Limite de manœuvre 42

8. Réglage des pales 47

8.1. Réglage au sol 47
8.2. Réglage en vol 53

9. Limitations des pièces travaillant en fatigue 54

9.1. Phénomène de fatigue 54
9.2. Endommagement dû à la fatigue 59

Chapitre 3
Performances

1. Vol stationnaire – Théorie de Froude 63

2. Vol stationnaire – Théorie de l'élément de pale 66

2.1. Évaluation de l'incidence aérodynamique d'une section de pale 67

3. Vol stationnaire – Effet de sol 71

4. Fenestron (rotor caréné équipant les appareils d'Airbus helicopters) 74

5. Vol en palier 79

5.1. Puissance induite 80

5.2. Puissance de profil 82

5.3. Puissance de fuselage 84

6. Vol en montée verticale 87

7. Vol en montée oblique 91

8. Autorotation et diagramme hauteur-vitesse 94

8.1. Caractéristiques des profils dans les coordonnées d'Eiffel 94

8.2. Caractéristiques des profils dans les coordonnées de Lilienthal 95

8.3. Atterrissage en autorotation 100

8.4. Diagramme hauteur-vitesse des appareils multimoteurs 103

9. Distance de décollage 105

10. Anneaux tourbillonnaires ou *vortex* 108

Chapitre 4
Qualités de vol

1. Le moment de commande 111

2. Stabilité statique longitudinale 115

3. Stabilité statique transversale 119

3.1. Effet girouette 121
3.2. Effet dièdre 122

4. Maniabilité 124

4.1. Mouvement de tangage ou de roulis en vol stationnaire 124
4.2. Mouvement de lacet en vol stationnaire 126
4.3. Généralisation au vol d'avancement 127
4.4. Étude de la réponse à un échelon 128

5. Stabilité dynamique 132

5.1. Stabilité dynamique de tangage (phugoïde) 132

6. Manœuvrabilité 135

6.1. Marge au palonnier 135
6.2. Marge au cyclique longitudinal 138
6.3. Marge au cyclique latéral 139

7. Évaluation des qualités de vol selon l'échelle de Cooper-Harper 140

8. Vibrations 141

8.1. Rappels de dynamique 143
8.2. Analyse harmonique 144
8.3. Analyse spectrale 145
8.4. Systèmes à plusieurs degrés de liberté 148
8.5. Dispositifs antivibrations 151

9. Stabilité torsionnelle 155

Chapitre 5
Évolutions et perspectives

1. Convertible et combiné 157

2. Convertible Bell/Boeing V22 159

3. Combiné expérimental Sikorsky X^2 162

4. Combiné expérimental Airbus helicopters X^3 165

5. Conclusion 167

Annexes 169

Bibliographie 183

Index 185

Le comportement en vol d'un hélicoptère peut être analysé globalement à l'aide de modélisations simples mais réalistes pourvu que l'on prenne en compte certaines hypothèses simplificatrices résultant de l'expérimentation. Lorsque l'on s'intéresse aux propriétés du rotor articulé, on peut décrire avec une bonne approximation les caractéristiques dynamiques des hélicoptères monorotors, et même extrapoler ce concept au moyeu non articulé (rotor « rigide »). En ce qui concerne le calcul des performances de masse décollable, les raffinements successifs apportés à la théorie du vol stationnaire assurent aujourd'hui une prédiction très satisfaisante. Pour le vol d'avancement, la modélisation est nettement moins réaliste car elle est fondée sur des bases théoriques moins rigoureuses.

Les qualités de vol peuvent être quantifiées à l'aide de modèles simples hérités de la théorie des asservissements. Il est ainsi possible aux spécialistes des essais en vol de fournir au bureau d'études les informations nécessaires pour orienter la mise au point des prototypes.

Cette deuxième édition de *Mécanique du vol de l'hélicoptère* tient compte des évolutions de ces dernières années dans le domaine et s'est dotée d'un chapitre consacré à l'analyse des problèmes vibratoires, sujet particulièrement sensible pour les appareils modernes à hautes performances. Les hélicoptères combinés à grande vitesse, qui font actuellement l'objet de développements exploratoires en Europe et aux États-Unis, sont également abordés. Successeurs des hélicoptères convertibles, ces appareils vont sans nul doute transformer en profondeur la technologie des voilures tournantes.

Cet ouvrage fondamental s'adresse aux professionnels de l'industrie aéronautique, mais également aux étudiants pilotes et ingénieurs.

Pierre Rougier *est ingénieur de l'École centrale de Lyon. Après un doctorat en mécanique des fluides à l'Office national d'études et de recherches aérospatiales, il a rejoint le bureau d'étude d'Aérospatiale (aujourd'hui Airbus helicopters) comme spécialiste des rotors d'hélicoptère, puis a été affecté au département des essais en vol en qualité d'ingénieur navigant d'essais des hélicoptères « Gazelle », « Dauphin » et « Tigre ». Il est aujourd'hui consultant auprès d'Airbus helicopters pour l'analyse de sécurité des prototypes et des appareils en développement.*

editions.lavoisier.fr

978-2-7462-4694-2