

Table des matières

Introduction	11
Chapitre 1. Evolution des besoins et différentes visions	15
1.1. Besoins en termes d'actionnement pour le pilotage	15
1.1.1. Réduire les efforts de pilotage	15
1.1.2. Réduire la charge intellectuelle du pilote	16
1.1.3. Permettre un pilotage autonome et automatique	17
1.1.4. Accroître les performances de l'aéronef	17
1.1.5. Faciliter le développement et l'intégration	18
1.2. Fonctions et architectures	18
1.2.1. Vision signal	19
1.2.2. Vision puissance	20
1.2.3. Fonctions de base en actionnement	22
1.2.3.1. Exemple 1 : actionneur de gouverne du bombardier Northrop B2	24
1.2.3.2. Exemple 2 : actionneur de gouverne de direction du Boeing B777	25
1.2.4. Actionneurs hydromécaniques	27
1.2.5. Actionnement plus ou tout électrique	28
Chapitre 2. Actionneurs à signaux électriques (<i>Signal-by-Wire</i>)	31
2.1. Evolution vers le SbW à travers l'exemple des commandes de vol	32
2.1.1. Applications militaires	32
2.1.2. Avions commerciaux	32
2.1.3. Hélicoptères et convertibles	35
2.2. Evolution incrémentale du tout mécanique au tout électrique	37

2.2.1. Chaîne d'information exclusivement mécanique	39
2.2.1.1. Fonction primaire de pilotage	41
2.2.1.2. Augmentation et automatisation des ordres de pilotage	42
2.2.1.3. Réduction des efforts de pilotage	46
2.2.2. <i>Fly-by-Wire</i>	47
2.2.2.1. <i>Fly-by-Wire</i> intégral	48
2.2.2.2. Pseudo <i>Fly-by-Wire</i>	50
2.3. Challenges associés à l'électrification de la chaîne de commande	51
2.3.1. Interfaces électriques	51
2.3.1.1. Interfaces de puissance	51
2.3.1.2. Interfaces de mesure des grandeurs physiques dans l'actionneur	52
2.3.1.3. Interfaces homme-machine	55
2.3.2. Evolution des architectures de commande et de transmission d'information	58
2.3.2.1. CdVE analogiques à commande de l'actionneur centralisée	59
2.3.2.2. CdVE numériques à commande de l'actionneur centralisée	59
2.3.2.3. CdVE numériques à commande de l'actionneur déportée et mutualisée	59
2.3.2.4. CdVE à actionneurs intelligents	60
2.3.3. Fiabilité et chaînes de secours	61
2.3.3.1. Secours à technologie fluïdique	61
2.3.3.2. Secours électrique analogique	61
2.3.3.3. Architecture COM/MON	63
2.4. L'exemple des atterrisseurs	64

Chapitre 3. Architectures et communication en *Signal-by-Wire* 67

3.1. Architectures	68
3.1.1. Architectures fédérées	68
3.1.1.1. Avantages	68
3.1.1.2. Inconvénients	69
3.1.2. Architectures modulaires intégrées	69
3.2. Transmission de données	71
3.2.1. CAN	73
3.2.2. RS422 et RS485	73
3.2.3. Arinc 429	75
3.2.4. MIL-STD 1553B	75
3.2.5. Arinc 629	76
3.2.6. AS-5643/IEEE-1394b	76

3.2.7. AFDX (Arinc 664 Part 7)	77
3.2.7.1. Commutateurs	78
3.2.7.2. Liens	78
3.2.7.3. Terminaux utilisateurs	79
3.2.8. <i>Time Triggerred Protocol</i> (TTP/C)	79
3.3. Evolutions en matière de transmission de données	80
3.3.1. <i>Power over Data</i> et <i>Power Line Communication</i>	81
3.3.2. Transmission optique de données (<i>Signal-by-Light</i> ou SbL)	82
3.3.3. Transmission sans fil de données (<i>Signal-by-WireLess</i> ou SbWL)	85

Chapitre 4. Actionneurs à puissance électrique (*Power-by-Wire*) 87

4.1. Inconvénients de la transmission de puissance hydraulique	88
4.1.1. Capacité de puissance des pompes hydrauliques	89
4.1.2. Rendement des pompes hydrauliques	89
4.1.3. Production de puissance centralisée	90
4.1.4. Transmission de puissance par transport de matière	90
4.1.4.1. Impact négatif sur l'environnement et risques pour les personnes	90
4.1.4.2. Besoin de conditionnement du fluide	90
4.1.4.3. Reconfiguration difficile	91
4.1.4.4. Intégration contraignante dans l'aéronef	91
4.1.5. Dosage de puissance par dissipation d'énergie	91
4.2. Puissance électrique <i>versus</i> puissance hydraulique	92
4.3. Amélioration des solutions à puissance hydraulique	96
4.3.1. Réduction des pertes énergétiques au niveau des actionneurs	96
4.3.1.1. Réduction des fuites des servovalves	96
4.3.1.2. Réglage de cylindrée à destination	97
4.3.2. Augmentation de la densité de puissance des réseaux	97
4.3.3. Autres concepts	97
4.4. Concepts combinant l'hydraulique et l'électrique	99
4.4.1. Génération électro-hydraulique locale	99
4.4.2. Actionneurs électro-hydrostatiques	100
4.4.2.1. Principe de la puissance selon la demande	101
4.4.2.2. Action sur la cylindrée de pompe (EHA-VD)	104
4.4.2.3. Action sur l'entraînement de la pompe (EHA-FD)	105
4.4.2.4. Dosage hydrique (EBHA)	107
4.5. Actionnement tout électrique (<i>hydraulic-less</i>)	108

Chapitre 5. Transmission et dosage de puissance en électrique	111
5.1. Transport de la puissance électrique vers les actionneurs PbW	111
5.1.1. Forme	112
5.1.2. Niveaux de tension et de courant	113
5.1.2.1. Courant	115
5.1.2.2. Tension	117
5.2. Moteurs électriques	118
5.2.1. Machines électriques élémentaires	118
5.2.1.1. Machine à courant continu (ou moteur DC)	121
5.2.1.2. Machine synchrone à courant alternatif	122
5.2.1.3. Machine asynchrone à courant alternatif	122
5.2.2. Transformation de puissance électrique en puissance mécanique	122
5.3. Conversion, dosage et gestion de puissance	125
5.3.1. Chaîne de puissance électrique d'un actionneur PbW	125
5.3.2. Principe et intérêt des interrupteurs statiques	127
5.3.3. Association des interrupteurs : cellule de commutation, hacheur et onduleur	129
5.3.3.1. Hacheur rhéostatique	130
5.3.3.2. Cellule de commutation	131
5.3.3.3. Hacheur quatre quadrants	131
5.3.3.4. Onduleur	131
5.3.4. Commande de l'onduleur	132
5.3.4.1. Commande statique (ou <i>6-step</i>) d'un moteur BLDC	132
5.3.4.2. Commande vectorielle (<i>vector control/field oriented control</i> ou FOC)	134
5.3.5. Architecture de puissance d'un actionneur PbW	139
5.4. Effets induits, subis ou exploités	141
5.4.1. Dynamiques en présence	141
5.4.2. Ondulation de couple	144
5.4.3. Pertes d'énergie	145
5.4.3.1. Electronique de puissance	145
5.4.3.2. Moteur	147
5.4.3.3. Rendement global	149
5.4.4. Impact des concepts et des architectures sur les performances	150
5.4.5. Fiabilité	152
5.4.5.1. Taux de défaillance	152
5.4.5.2. Architectures redondantes	153
5.4.5.3. Surveillance de l'état de santé	155
5.5. Intégration	156
5.5.1. Intégration globale de l'actionneur	156

5.5.2. Refroidissement	158
5.5.3. Architecture mécanique des boîtiers d'électronique de commande moteur	161
Chapitre 6. Actionneurs électro-hydrostatiques	163
6.1. Historique et maturation des EHA	163
6.1.1. Actionneurs PbW avec pompe à cylindrée variable (EHA-VD)	163
6.1.1.1. Actionneurs Boulton Paul	163
6.1.1.2. Actionneurs SSAP	164
6.1.1.3. Actionneurs IAP	165
6.1.1.4. Actionneurs EHA-VD	169
6.1.2. Actionneurs EHA à cylindrée fixe et à vitesse variable	169
6.1.2.1. Développement des EHA-FD pour les commandes de vol aux Etats-Unis	169
6.1.2.2. Développement des EHA-FD pour les commandes de vol en Europe	172
6.1.2.3. Développement des EHA-FD pour les trains d'atterrissage	178
6.2. EHA en service et retours d'expérience	182
6.3. Spécificité des EHA	185
6.3.1. Pompes	185
6.3.2. Remplissage et précharge	186
6.3.3. Augmentation dynamique de la pression moyenne (<i>pump-up</i>)	187
6.3.4. Pertes énergétiques et équilibre thermique	188
6.3.4.1. Rendement	188
6.3.4.2. Effet de la température	188
6.3.4.3. Amélioration des échanges thermiques dans les EHA	190
6.3.5. Dissymétrie	191
6.3.6. Commande	192
Chapitre 7. Actionneurs électromécaniques	195
7.1. Développement et exploitation des actionneurs électromécaniques	196
7.1.1. Lanceurs spatiaux	197
7.1.2. Commandes de vol	202
7.1.2.1. Commandes de vol primaires	202
7.1.2.2. Commandes de vol secondaires	206
7.1.3. Atterrisseurs	207
7.1.3.1. Freinage	207
7.1.3.2. Extension/rétraction	210
7.1.3.3. Orientation	211

7.1.4. Hélicoptères	213
7.1.5. Application aux moteurs	217
7.2. Spécificités des EMA	218
7.2.1. Architectures de puissance	218
7.2.1.1. Redondance	218
7.2.1.2. Mouvement de sortie	219
7.2.1.3. Réducteur intermédiaire	220
7.2.1.4. Intégration interne de l'actionneur	222
7.2.2. Fonctions de gestion de puissance	225
7.2.3. Grippage	227
7.2.3.1. Améliorer la fiabilité des vis-écrou	229
7.2.3.2. Anticiper le grippage	229
7.2.3.3. Accepter le grippage d'un actionneur	230
7.2.3.4. Débrayer l'actionneur de la charge en cas de grippage	230
7.2.3.5. Rendre le vis-écrou redondant	233
7.2.4. Rupture	234
7.2.5. Equilibre thermique	234
7.2.6. Commande	235
7.2.6.1. Séquences et modes de fonctionnement	235
7.2.6.2. Dynamique de réjection des efforts extérieurs	236
7.2.7. Autres considérations	237
Notations et acronymes	239
Bibliographie	247
Index	261
Sommaire du volume 1	265