

Table des matières

Introduction	1
Chapitre 1. Considérations générales	5
1.1. Généralités	5
1.1.1. Définitions	5
1.1.1.1. Système	5
1.1.1.2. Actionneur	6
1.1.2. Besoin et flux de puissance	7
1.1.3. Fonctions d'actionnement	8
1.1.3.1. Les commandes de vol	9
1.1.3.2. Les atterrisseurs	11
1.1.3.3. Les moteurs	12
1.1.3.4. Les servitudes	13
1.1.4. Besoin et contraintes en actionnement	14
1.1.4.1. Type d'opération	14
1.1.4.2. Commande	14
1.1.4.3. Puissance et dynamique	14
1.1.4.4. Modes d'opération	18
1.1.4.5. Environnement	18
1.1.4.6. Durée de vie et échelle de temps	19
1.1.4.7. Fiabilité et disponibilité	19
1.1.4.8. Maturité	19
1.1.4.9. Topologie	20
1.1.5. Classification et cadre réglementaire	20
1.1.5.1. Complexité et décomposition	20
1.1.5.2. Catégorisation	22
1.1.6. Cycle de développement	25

1.1.6.1. Cahier des charges	25
1.1.6.2. Vérification et validation	27
1.2. Fonctions primaires et secondaires en transmission de puissance pour les actionneurs.	28
1.2.1. Fonctions primaires.	29
1.2.2. Fonctions secondaires	31
1.2.3. Vision signal et vision puissance	33
1.2.4. Types d'actionneurs	34

Chapitre 2. Fiabilité 39

2.1. Le risque et son acceptation	39
2.2. <i>Dependability</i>	43
2.2.1. De la faute à la défaillance	44
2.2.1.1. Faute	44
2.2.1.2. Erreur.	45
2.2.1.3. Défaillance	45
2.2.2. Lutte contre les défaillances.	45
2.3. Réponse à la faute pour les actionneurs aéronautiques	46
2.3.1. Résistance à la faute	46
2.3.2. Tolérance à la faute.	47
2.3.2.1. Système actif après défaillance.	49
2.3.2.2. Système non actif après défaillance	49
2.3.3. Exemples	50
2.4. Redondance.	52
2.4.1. Redondance statique	55
2.4.1.1. Redondance simple parallèle	56
2.4.1.2. Redondance par moyenne.	57
2.4.2. Redondance dynamique	58
2.4.2.1. Détection/correction	59
2.4.2.2. Commande/surveillance.	61
2.5. Combinaison des principes de redondance	62
2.6. Événements redoutés et taux de défaillance en actionnement	62
2.7. Bases du calcul de fiabilité.	63
2.7.1. Variables utilisées pour le calcul de fiabilité	63
2.7.2. Modèles génériques du taux de défaillance.	66
2.7.2.1. Distribution de probabilité de défaillance exponentielle.	67
2.7.2.2. Distribution de Weibull	68
2.7.3. Fiabilité d'une association d'éléments.	68
2.7.3.1. Association d'éléments en série	69
2.7.3.2. Association d'éléments en parallèle.	69

2.7.3.3. Association d'éléments en vote majoritaire	70
2.7.3.4. Association d'éléments en détection-correction	70
2.8. Références et glossaire succinct de fiabilité	72

Chapitre 3. Concepts généraux pour les solutions

à puissance hydraulique	75
3.1. Actionnement à puissance hydraulique	75
3.1.1. Unités et valeurs usuelles	75
3.1.2. Transport d'énergie par un liquide	76
3.1.2.1. Transport par gravité	76
3.1.2.2. Transport sous forme (hydro)cinétique	77
3.1.2.3. Transport sous forme hydrostatique	77
3.1.2.4. Transport sous forme de chaleur	78
3.1.3. Évolution de la puissance et de la pression	80
3.1.3.1. Augmentation du besoin de puissance	80
3.1.3.2. Augmentation de la pression de service	84
3.2. Avantages et inconvénients potentiels de la technologie hydraulique . .	86
3.2.1. Avantages	86
3.2.1.1. Densité de puissance élevée au niveau des équipements . . .	87
3.2.1.2. Facilité de production d'efforts élevés à faible vitesse . . .	87
3.2.1.3. Dynamique de réponse et capacité d'accélération élevées . .	87
3.2.1.4. Évacuation aisée de la chaleur produite par les pertes d'énergie	87
3.2.1.5. Facilité de réalisation des fonctions secondaires	87
3.2.1.6. Absence de sensibilité ou de production d'interférences électromagnétiques	88
3.2.1.7. Fort niveau de maturité technologique	88
3.2.2. Inconvénients	88
3.2.2.1. Faible densité de puissance au niveau de la distribution . . .	88
3.2.2.2. Besoin de conditionnement du fluide	89
3.2.2.3. Gestion de la puissance et reconfiguration difficiles	89
3.2.2.4. Fortes contraintes d'intégration	89
3.2.2.5. Agressivité du liquide hydraulique	89
3.2.2.6. Dosage de puissance par dissipation d'énergie	89
3.2.2.7. Fuites internes permanentes	89
3.3. Concepts architecturaux	90
3.3.1. Architecture de puissance pour l'actionnement hydraulique . . .	90
3.3.2. Règles et recommandations de conception	91
3.3.2.1. Nombre de réseaux en puissance	92
3.3.2.2. Niveaux de pression	94
3.3.2.3. Température et fluide hydraulique	95
3.3.2.4. Autres aspects	96

Chapitre 4. Le fluide hydraulique et son conditionnement	97
4.1. Besoins, contraintes et évolutions.	97
4.1.1. Opportunités et contraintes en transmission de puissance hydrostatique	97
4.1.2. Plage de température opérationnelle et résistance au feu	99
4.1.2.1. Températures maximales	99
4.1.2.2. Températures minimales	100
4.1.2.3. Principaux fluides hydrauliques en aéronautique	100
4.2. Fluide hydraulique réel	103
4.2.1. Propriétés physiques	106
4.2.1.1. Méconnaissance des propriétés physiques effectives.	106
4.2.1.2. Influence de la compressibilité et de la dilatation sur les performances	106
4.2.1.3. Très forte sensibilité de la viscosité à la température.	107
4.2.1.4. Influence du gaz entraîné	107
4.3. Conditionnement du fluide.	107
4.3.1. Fluide en quantité suffisante	108
4.3.1.1. Faciliter l'aspiration des pompes.	108
4.3.1.2. Autoriser la variation de volume en fonction de la pression et de la température.	108
4.3.1.3. Compenser la variation du volume offert par les équipements	108
4.3.1.4. Compenser les fuites externes	109
4.3.2. Éviter la pollution gazeuse et la cavitation	109
4.3.2.1. Pressuriser	110
4.3.2.2. Gaver	110
4.3.3. Isoler la pollution solide	110
4.3.3.1. Filtre d'aspiration.	113
4.3.3.2. Filtre de drain	113
4.3.3.3. Filtre haute pression	113
4.3.3.4. Filtre intégral	113
4.3.3.5. Filtre de retour	113
4.3.3.6. Reniflard	113
4.3.3.7. Filtre de remplissage.	114
4.3.3.8. Fonctions additionnelles associées aux filtres	114
4.3.4. Gérer la température	115
4.3.4.1. Refroidir	115
4.3.4.2. Réchauffer	117
4.3.5. Collecter les fuites externes	119
4.3.6. Surveiller et maintenir le fluide en conditions opérationnelles . .	119
4.3.6.1. Quantité de fluide	120
4.3.6.2. Contamination et dégradation	120
4.3.6.3. Pressurisation/dépressurisation.	121

4.3.7. Impact sur la conception et l'opération des systèmes hydrauliques	121
4.3.7.1. Réservoir de type A	122
4.3.7.2. Réservoir de type B	123
4.3.7.3. Réservoir de type C	123
4.3.7.4. Réservoir de type D, à surface libre et pressurisé par gaz . .	123
4.3.7.5. Réservoir de type E	125
4.4. Phénomènes énergétiques engendrés par le fluide	126
4.4.1. Résistance hydraulique.	126
4.4.2. Capacité hydraulique.	127
4.4.3. Inertie hydraulique	129
4.4.4. Vitesse du son dans le fluide hydraulique.	129

Chapitre 5. Transformation de puissance hydromécanique 131

5.1. Considérations générales	131
5.2. Vision fonctionnelle.	137
5.3. Imperfections technologiques	139
5.3.1. Pertes d'énergie	139
5.3.1.1. Rendement.	139
5.3.1.2. Pertes mécaniques	140
5.3.1.3. Pertes volumétriques.	141
5.3.1.4. Courbes de rendement.	141
5.3.2. Compressibilité du fluide hydraulique.	142
5.3.3. Déformation des enveloppes	143
5.3.4. Pulsations.	143
5.3.5. Gavage	144
5.3.6. Drainage	145
5.4. Entraînement des pompes	146
5.4.1. Entraînement par les moteurs principaux : <i>Engine Driven Pump</i> (EDP)	146
5.4.2. Entraînement par moteur électrique : <i>Electric Motor (driven) Pump</i> (EMP) ou <i>Alternative Current Motor Pump</i> (ACMP)	148
5.4.3. Entraînement par moteur hydraulique : <i>Power Transfer Unit</i> (PTU).	149
5.4.4. Entraînement par air dynamique : <i>Ram Air Turbine driven pump</i> (RAT) ou turbine à air (<i>Air Turbine Driven Pump</i> , ADP)	150
5.4.5. Entraînement par turbine à gaz : <i>Solid Propellant Gas Generator</i> (SPGG) ou <i>Monofuel Emergency Power Unit</i> (MEPU)	151
5.4.6. Fourniture de fluide sous pression à fluide perdu	152
5.5. Moteurs hydrauliques	153

Chapitre 6. Dosage de puissance en hydraulique	155
6.1. Principes de dosage	155
6.2. Puissance à la demande	158
6.2.1. Pertes énergétiques à puissance partielle	158
6.2.2. Dosage par réglage de l'entraînement de pompe	159
6.2.3. Dosage par réglage de cylindrée	160
6.2.3.1. Dosage de puissance par réglage de cylindrée à la source	160
6.2.3.2. Dosage de puissance par réglage de cylindrée à destination	164
6.2.4. Circuit hydraulique fermé, circuit hydraulique ouvert	165
6.3. Dosage par restriction hydraulique	166
6.3.1. Configurations fonctionnelles	167
6.3.1.1. Utilisateur hydraulique simple effet et double effet	168
6.3.1.2. État intermédiaire	169
6.3.1.3. Fonction directionnelle et fonction de dosage	169
6.3.1.4. Dosage par régulateur de débit	171
6.3.1.5. Dosage par distributeur à effet proportionnel	171
6.3.2. Types de distribution	173
6.3.2.1. Distribution série	173
6.3.2.2. Distribution parallèle	174
6.4. Impact des propriétés et de la réalisation de la restriction sur la fonction de dosage	175
6.4.1. Restriction hydraulique fixe	175
6.4.1.1. Écoulement laminaire	175
6.4.1.2. Écoulement turbulent	176
6.4.1.3. Transition	176
6.4.1.4. Ordres de grandeur	177
6.4.2. Restriction hydraulique variable	177
6.4.2.1. Types de restrictions	177
6.4.2.2. Caractéristique géométrique d'une restriction variable	179
6.4.2.3. Capacité de puissance	181
6.4.2.4. Propriétés pour la commande	185
6.4.2.5. Interfaçage et commande d'ouverture de distributeur	187
6.4.2.6. Résistance ou tolérance au grippage	189
6.4.2.7. Exemples de détection de grippage	192
6.5. Servovalve	194
6.5.1. Architecture	195
6.5.2. Amélioration incrémentale des performances de la servovalve	198
6.5.3. Alimentation du moteur électromagnétique	198
6.5.4. Concepts des étages de pilotage	200
6.5.5. Biais fonctionnel	207
6.5.6. Servovalves à pilotage direct	208

6.5.6.1. Applications	208
6.5.6.2. Architecture des servovalves à pilotage direct.	210
6.5.7. Application au freinage des roues	212

Chapitre 7. Distribution et gestion de puissance en hydraulique 215

7.1. Distribution et gestion de puissance	215
7.2. Mettre la puissance à disposition	217
7.2.1. Transporter le fluide	217
7.2.1.1. Connecteurs hydrauliques.	217
7.2.1.2. Conduites hydrauliques	217
7.2.2. Isoler	221
7.2.3. Séquencer l'alimentation des utilisateurs	223
7.2.4. Réunir les sources.	224
7.2.5. Partager les sources.	225
7.2.5.1. Partage de débit avec priorité.	225
7.2.5.2. Partage de débit à égalité	226
7.2.6. Stocker/restituer.	227
7.2.6.1. Besoins.	227
7.2.6.2. Réalisation.	228
7.2.7. Adapter le niveau de pression.	230
7.3. Protéger	231
7.3.1. Protéger contre les surpressions et les sur-efforts	231
7.3.2. Protéger contre la cavitation et le dégazage.	234
7.3.3. Protéger contre les surconsommations.	236
7.4. Gérer la charge.	238
7.4.1. Bloquer la charge en position	238
7.4.2. Assurer l'irréversibilité.	239
7.4.3. Libérer la charge	240
7.4.4. Amortir la charge	241
7.4.4.1. Amortir une charge motrice lorsque l'actionneur est actif.	241
7.4.4.2. Amortir une charge hydrauliquement débrayée	242
7.4.4.3. Éviter les vibrations de charge	243
7.4.4.4. Amortir en fin de course	244
7.5. Surveiller	245

Chapitre 8. Architectures et intégration géométrique 247

8.1. Introduction.	247
8.2. Agencement des fonctions d'actionnement	247
8.3. Architectures et routage	249
8.3.1. Architectures des réseaux de puissance	250

8.3.1.1. Un seul réseau hydraulique	250
8.3.1.2. Deux réseaux hydrauliques	251
8.3.1.3. Trois réseaux hydrauliques	252
8.3.1.4. Quatre réseaux hydrauliques	254
8.3.1.5. Autres types d'architectures	256
8.3.2. Routage des réseaux de puissance	258
8.3.3. Architecture des actionneurs	258
8.3.3.1. Actionneur simplex réversible	259
8.3.3.2. Actionneur électrohydraulique irréversible	259
8.3.3.3. Actionneur électrohydraulique irréversible, redondant actif/actif	261
8.3.3.4. Actionneur rotatif à commande discrète	263
8.3.3.5. Actionneur électrohydraulique simplex rotatif avec fonctions de gestion de puissance multiples	265
8.4. Intégration des composants et des équipements	267
8.4.1. Intégration en ligne	267
8.4.2. Intégration sur collecteur	267
8.4.3. Intégration en sous-système	271
8.5. Intégration des actionneurs dans la structure porteuse.	273
8.5.1. Vis-à-vis de la commande	273
8.5.1.1. Actionneur linéaire à corps mobile	274
8.5.1.2. Actionneur à tige mobile	274
8.5.2. Intégration structurelle	276
8.5.2.1. Amplitude de mouvement limitée à quelques dizaines de degrés	276
8.5.2.2. Amplitude de mouvement supérieure à 90°	278
8.5.2.3. Commandes de vol secondaires	280
Annexe. Symboles graphiques pour l'hydraulique	281
Notations et acronymes	285
Bibliographie	293
Index	307