

Introduction

On peut percevoir l'importance des actionneurs aéronautiques à travers quelques chiffres. La flotte globale d'avions commerciaux dépassait les 35 500 unités en juin 2025 [IAT 25] et on comptait plus de 53 000 aéronefs militaires dans le monde en 2023 [FLI 23]. Le marché des actionneurs aéronautiques représentait au niveau mondial une somme de 11,6 milliards de dollars US en 2024 [STR 25]. Il devrait atteindre 15,6 milliards de dollars US en 2034, soit une progression de 3,3 % sur 10 ans. En 2025, le transport aérien aura fait voyager près de 5 milliards de passagers par an. Ces aéronefs comportent en moyenne 20 à 30 actionneurs dont certains peuvent être considérés comme critiques, c'est-à-dire dont la défaillance impacte directement la sécurité. Au-delà de ces considérations purement économiques, le chercheur, l'ingénieur ou le technicien sont plutôt concernés par la complexité et la criticité croissantes des actionneurs aéronautiques et des systèmes auxquels ils contribuent.

Cet ouvrage est le premier d'une série de trois volumes qui traite de ces actionneurs aéronautiques selon une vision système. L'accent est mis sur les actionneurs développant une puissance mécanique relativement élevée et pour des fonctions généralement critiques : commandes de vol, atterrisseurs, moteurs. Les autres applications d'actionnement (par exemple réglage des sièges, auto-manettes, vannes d'air ou de carburant) ne sont pas explicitement traitées. Cependant, le contenu de ces trois volumes peut être utilisé avec profit pour ces autres types d'applications. Dix ans après la première édition, ces nouveaux volumes sont réellement enrichis et mis à jour, avec plus d'explications, d'analyses, de détails, d'exemples, de valeurs numériques et de références.

Le premier volume est dédié aux généralités, à la fiabilité et aux actionneurs à source de puissance hydraulique. Le second volume porte sur les actionneurs plus électriques (électrohydrauliques, électrohydrostatiques et électromécaniques), autant sous l'aspect signal (*Signal-by-Wire*) que sous l'aspect puissance (*Power-by-Wire*). Le troisième volume illustre les concepts présentés dans les deux volumes précédents à

partir d'exemples variés, tant au niveau des applications (commandes de vol, atterrisseurs et moteurs) qu'au niveau des types d'aéronefs (avions commerciaux, militaires ou d'affaires, hélicoptères, convertibles et lanceurs spatiaux).

Pour développer la vision système dans cette série, le défi consiste à combiner judicieusement une approche descendante (du besoin vers la solution) à une approche montante (de la maturité technologique vers la solution). L'idée maitresse est donc de se focaliser sur les besoins et les architectures (fonctionnelles puis conceptuelles) tout en présentant les limitations imposées par la technologie à la réalisation des concepts, en particulier au niveau des fonctions et des phénomènes induits par les choix technologiques. En effet, on conçoit en pratique des solutions en considérant les aspects fonctionnels à mettre en œuvre et à combiner. Ensuite, on évalue les performances en considérant de plus les imperfections de la technologie¹, comme par exemple l'hystérésis magnétique, l'inductance des bobinages, le jeu mécanique ou encore la résistance hydraulique des conduites. Les aspects architecturaux sont en général mal documentés dans la bibliographie et parfois quelque peu négligés dans les projets. Ils sont donc traités dans cet ouvrage de façon privilégiée par rapport aux aspects dimensionnement et aux aspects technologiques. Il ne faut cependant pas en déduire que le dimensionnement et la technologie sont peu importants. Bien au contraire, ils sont eux aussi essentiels. Il est en effet très fréquent qu'à une date donnée, ce soit la technologie qui limite l'intérêt industriel d'un concept sous les aspects performance, fiabilité et coût. De même, ce sont la finesse des modèles et la capacité de calcul pour les exploiter qui limitent souvent la réduction des marges de sécurité et l'optimisation de la conception.

Les aspects dimensionnement, modélisation et technologie sont en général bien documentés dans la bibliographie mais la composante architecturale, fonctionnelle et conceptuelle est souvent peu abordée. La difficulté est donc bien de formaliser les architectures et les concepts. Le recours aux modèles mathématiques et à la description de la technologie est seulement employé dans cet ouvrage lorsqu'ils sont nécessaires à la compréhension et au choix. La vision système orientée « architectures » permet de mettre l'accent sur les fonctions à remplir et sur les interdépendances entre les constituants du système. Elle offre un réel potentiel d'amélioration des performances globales en comparaison à la vision orientée « constituant » car l'optimum au niveau système est très rarement la somme des optimums pour chaque constituant. En aéronautique commerciale, le développement d'une telle vision est encore rendu difficile par l'organisation des bureaux d'études qui suit souvent le découpage par domaines

1. Selon l'application, il est possible qu'un même phénomène physique dans un élément technologique soit exploité pour réaliser une fonction ou bien apparaisse comme une imperfection de la technologie qui vient altérer la performance d'une fonction. La résistance d'un bobinage de moteur en est un exemple parlant : c'est une source de perte d'énergie, mais c'est aussi grâce à elle que l'on peut commander un moteur en couple électromagnétique par action sur la tension hachée appliquée au bobinage (voir volume 2).

de l'aéronef, et donc souvent par « métiers ». Ce découpage a été standardisé pour la première fois par l'Air Transport Association il y a plus de 50 ans [A4A 2200]. Néanmoins, la vision transversale est de plus en plus favorisée par la mise en place de plateaux, par la valorisation des fonctions d'expert système et par l'émergence de formations initiales en ingénierie système couvrant autant l'aspect puissance que l'aspect signal.

Dans ce premier volume, une place importante est accordée aux actionneurs à puissance hydraulique. Ce choix peut être surprenant à une époque où l'on met en avant les solutions « plus électrique » et même « tout électrique ». Il est justifié par plusieurs considérations importantes :

- la technologie hydraulique est largement employée pour les fonctions d'actionnement sur tous les aéronefs, y compris les plus récents. La durée de vie d'un aéronef commercial est typiquement de 30 ans et sa durée de commercialisation dépasse fréquemment elle aussi les 30 ans. Les nouveaux modèles d'aéronefs des années 2020 devraient donc encore voler en 2080 ;

- la maturation des solutions plus ou tout électriques qui sont évaluées en laboratoire peut prendre plus d'une décennie avant d'atteindre un niveau tel que la nouvelle technologie puisse être mise en service. Par exemple, les actionneurs électrohydrostatiques qui ont été mis en service sur l'Airbus A380 en 2007 ont commencé à être développés dans le milieu des années 1980 ;

- il est important de penser en termes de besoin et de performances plutôt que d'orienter les choix *a priori* vers une solution technologique donnée. De ce point de vue, le plus ou le tout électrique devrait seulement être un moyen, et non pas un objectif ou une finalité, pour rendre des services plus sûrs, plus respectueux de l'environnement, plus économiques et plus rapides² (*safer, greener, cheaper, faster*) ;

- la suppression progressive ou déjà mise en place des enseignements d'hydraulique dans les formations d'ingénieurs conduit quant à elle à une perte de compétences initiales. Ceci plaide en faveur d'un effort de capitalisation de la connaissance qui a tendance à disparaître.

À travers l'accent qui est mis sur la vision système, besoins et architectures, cet ouvrage développe une vision complémentaire des ouvrages existants qui constituent une source d'information importante. On ne peut donc que recommander les ouvrages suivants qui permettent d'élargir le champ couvert par cette série :

- globalement pour tous les systèmes aéronautiques, [CRA 99, DAN 15, MOI 08, ROS 00, SAU 09, SCH 21, WIL 08, WIL 09] ;

2. En matière d'aéronautique commerciale, la composante rapidité semble avoir disparu des objectifs majeurs car dans l'état actuel de la technologie, elle impacte très fortement les trois premières composantes.

- pour les fonctions d’actionnement aéronautique, [RAY 93, SCHM 98] ;
- pour l’hydraulique aéronautique, [GRE 85, JEP 85, NEE 91] ;
- pour l’hydraulique générale, [BLA 60, FAI 81, FAY 91, GUI 92, MAR 80, MER 67, VIE 80]³ ;
- ainsi que les nombreux documents techniques. Dans cet ouvrage, on se limitera souvent à ne citer que les documents édités par la SAE (Society of Automotive Engineers), en particulier par le comité A-6 (*Aerospace Actuation, Control and Fluid Power Systems*), tels que les normes (AS pour *Aerospace Standard*), recommandations (ARP pour *Aerospace Recommended Practice*) et états de l’art (AIR pour *Aerospace Information Report*). Selon les sujets, il est cependant important de se référer également aux documents produits par l’ASME, l’ASTM, l’ARINC, l’EASA, l’IEEE, l’ISO, la NASA, l’OTAN, la RTCA et le gouvernement américain.

Pour tous les sujets traités dans ce volume, le lecteur trouvera également dans le volume 3 de nombreux exemples détaillés et analysés.

Le présent volume⁴ comporte huit chapitres. Le premier traite des généralités avec un accent particulier sur les besoins et les applications. Le second concerne la fiabilité qui impacte très fortement les choix d’architectures durant les phases très préliminaires du développement. Les chapitres qui suivent sont dédiés aux actionneurs à source de puissance hydraulique. Ils permettent de passer successivement en revue les concepts généraux, la fonction de vecteur d’énergie réalisée par le fluide hydraulique et son conditionnement, les fonctions de transformation, de dosage et de gestion de la puissance, et enfin l’intégration des actionneurs et des systèmes hydrauliques.

3. Le lecteur pourrait être surpris de l’âge de ces références. En pratique, elles constituent une base de connaissance extrêmement solide sur les phénomènes et leur modélisation à paramètres localisés. En effet, ces références ont été publiées à une époque à laquelle les modèles devaient essentiellement être élaborés analytiquement pour l’analyse et la conception. Par rapport aux modèles numériques des dernières décennies, ces modèles analytiques ont l’avantage de montrer explicitement la contribution de chaque paramètre à l’effet modélisé.

4. Cet ouvrage présente des informations, travaux et analyses fondés sur l’état des connaissances techniques et scientifiques disponibles à la date de sa rédaction. Malgré le soin apporté à la vérification des données et des sources, des erreurs ou imprécisions peuvent cependant subsister.