

Vers des aéronefs plus électriques : exemple des commandes de vol

Etude d'un actionneur électromécanique (EMA)

sylvain.pluchart@siemens.com

Décembre 2021

Première partie Introduction

1 L'électrification des aéronefs

Un nombre croissant des systèmes à bord des aéronefs fait appel à l'énergie électrique. Cette tendance concerne différentes fonctions, on peut citer par exemple :

- le remplacement des systèmes pneumatiques, comme le conditionnement de l'air cabine ou le dégivrage des bords d'attaque. Dans ce cas un système électrique permet d'éviter le prélèvement d'air sur les moteurs.
- la propulsion des aéronefs. De nombreux concepts de chaîne de propulsion hybride ou complètement électrique (Figure 1) sont actuellement à l'étude. Ces travaux se font dans le cadre d'une réduction de la consommation de carburants fossiles et des émissions qui l'accompagne. Une réduction du bruit aux abords des aéroports et zones habitées est également attendue.
- les actionneurs, pour la manipulation des trains d'atterrissement, le freinage, ou comme on le verra plus en détails dans ce cours, les commandes de vol. Dans ce cas c'est le plus souvent des systèmes hydrauliques qui sont remplacés.

L'électrification des systèmes a des applications pour les engins spatiaux. On peut citer les actionneurs des moteur fusée (pour l'orientation de la tuyère, le *thrust vectoring* présenté en Figure 2, la commande des valves carburants ou l'entrainement des pompes carburants), ou la propulsion des satellites nécessaires à leur opérations en orbite.



FIGURE 1 – Le Velis Electro du constructeur slovène Pipistrel est le premier avion à propulsion 100% électrique à recevoir un certificat de type de la part de l'EASA. Photo extraite du site officiel du constructeur.

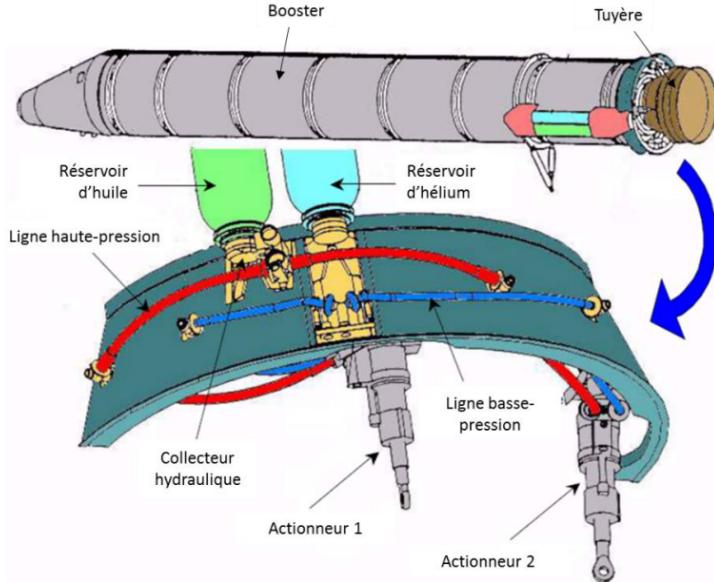


FIGURE 2 – Le pilotage d'un lanceur se fait par l'orientation du vecteur poussée. Cet exemple montre les actionneurs hydrauliques installés sur les *boosters* du lanceur Ariane 5. Extrait de [BHC19].

2 Eléments de mécanique du vol

2.1 Cas de l'avion

2.1.1 Bilan des forces

Les conditions de vol de l'avion sont décrites par les équations de la mécanique classique :

$$\sum F_{ext} = m\gamma \quad (I.1)$$

$$\sum M = J\dot{\omega} \quad (I.2)$$

Dans le bilan des forces appliquées à l'avion, on peut distinguer :

- les forces de masse : pesanteur, forces d'inertie
- les forces de surface : forces de propulsion, forces aérodynamiques
- les forces ponctuelles : freinage, catapultage, remorquage, ...

Dans ce cours on va s'intéresser aux forces aérodynamiques, liées au déplacement de l'air sur le fuselage, les ailes et autres éléments structuraux de l'avion.

Une projection des forces appliquées sur l'avion dans le plan vertical montre que les forces aérodynamiques R_a peuvent se décomposer en une force de portance L (pour *Lift*) et une force de trainée D (pour *Drag*). Dans le cas d'un vol horizontal à l'équilibre (Figure 3), la portance compense le poids de l'avion et la trainée est compensée par la poussée du ou des moteurs.

2.1.2 Manoeuvres et surfaces de contrôle

Pour être en mesure de piloter¹ l'avion, des surfaces de contrôle (ou surfaces mobiles) permettent de générer des efforts à différents emplacements de la structure. Cela permet de créer des couples suivant les trois axes du repère de l'avion présentés Figure 4 : en roulis (*roll*), en tangage (*pitch*) et en lacet (*yaw*). Les surfaces de contrôle classiques d'un avion de transport sont présentées Figure 5. On les trouve au niveau de la voilure et de l'empennage.

1. par "piloter" on entend à la fois un rôle d'équilibrage et aussi de déstabilisation pour déclencher des manœuvres

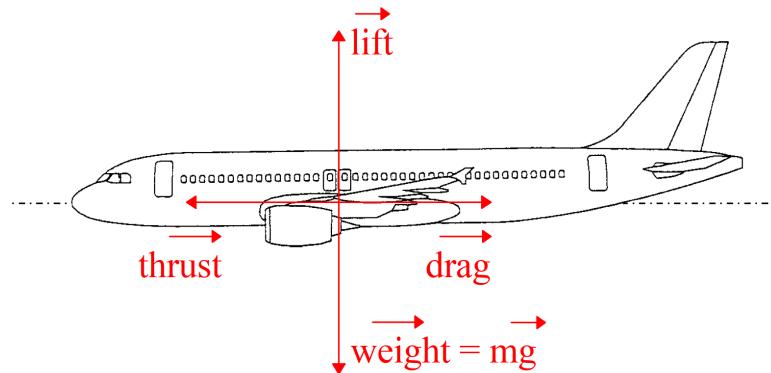


FIGURE 3 – Equilibre des forces dans le plan vertical en vol horizontal stabilisé, extrait de [Ser02].

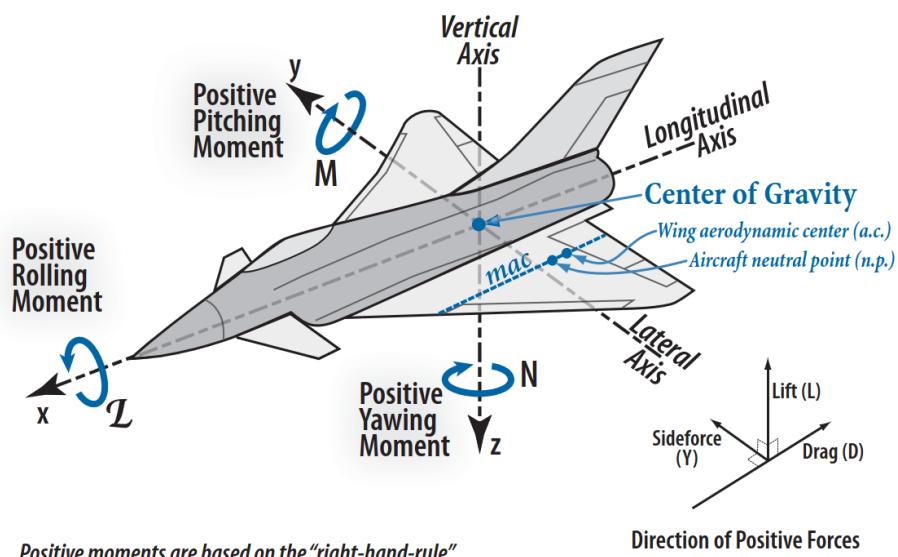


FIGURE 4 – Axes du repère avion utilisés pour décrire les manœuvres, extrait de [NC10].

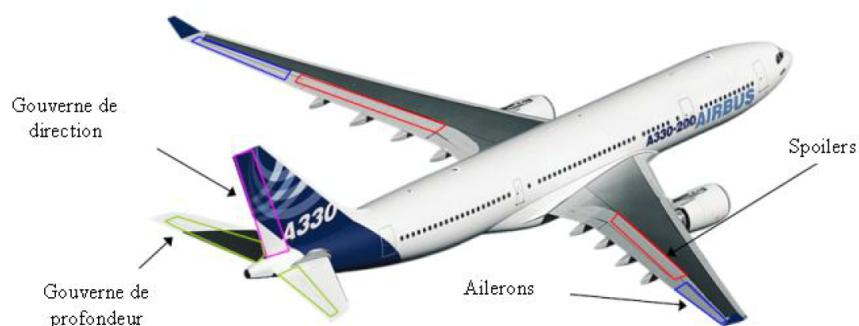


FIGURE 5 – Surfaces de contrôle classiques d'un avion de ligne, extrait de [Ber08]

surfaces de contrôle de l'empennage L'empennage se trouve à l'arrière de l'avion. Il est généralement composé de deux ensembles :

- un plan fixe horizontal (le stabilisateur) et sa surface mobile, la gouverne de profondeur (*elevator*),
- un plan fixe vertical (la dérive) et sa surface mobile, la gouverne de direction (*rudder*).

Le contrôle en tangage est assuré par la gouverne de profondeur et le contrôle en lacet par la gouverne de direction.

surfaces de contrôle de la voilure Les ailerons sont situés dans le prolongement de la voilure en position neutre, au niveau du bord de fuite. Un braquage vers le bas tend à augmenter la portance en augmentant la cambrure du profil (et inversement pour un braquage vers le haut). Les *spoilers* (ou aérofreins) sont situés sur l'extrados de la voilure. Plaqués en position neutre, ils permettent à la fois de "casser" la portance et d'augmenter la trainée en créant une zone de recirculation derrière la surface.

exemple d'une manœuvre en roulis Le mouvement en roulis est le résultat d'une différence de portance entre les deux ailes, que l'on peut créer par un braquage dissymétrique des ailerons et des spoilers. Les ailerons utilisés seuls peuvent suffrir à créer un moment de roulis (Figure 6), sans vraiment dégrader la portance et sans augmenter la trainée. Ils ont de plus peu d'influence sur les autres mouvements de l'avion (absence de couplage). Leur efficacité est par contre diminuée à faible vitesse (manque de pression dynamique) et à forte vitesse (moment de charnière important, vrillage de la voilure). On utilise dans ce cas les spoilers en renfort.



FIGURE 6 – Pour provoquer une manœuvre en roulis, on peut augmenter la portance d'une aile en dégradant celle de l'autre en braquant les ailerons (schéma de gauche). Les aérofreins (schéma de droite) peuvent être utilisés pour renforcer cet écart de portance. Extrait de [Ber08]

Il faut noter qu'il existe d'autres surfaces mobiles qui ne seront pas considérées comme des surfaces de contrôle, comme dans le travail [Ber08]. On citera par exemple les becs et les volets qui permettent d'augmenter la portance des ailes à faible vitesse.

2.2 Cas de l'hélicoptère

Le cas de l'hélicoptère, qu'on ne détaillera pas davantage dans la suite de ce cours, est très différent. Dans le cas de l'avion on agit sur le fuselage pour le pilotage (et les éléments propulsifs "suivent"). Dans le cas de l'hélicoptère, on pilote directement la force propulsive du rotor principal (et le fuselage "suit").

Les commandes de vol dans ce cas agissent sur le pas des pales. Comme présenté Figure 7 un changement simultané du pas de toutes les pales permet de faire varier la portance (pas collectif), un changement du pas sur une partie de la rotation permet d'orienter le rotor (pas cyclique).

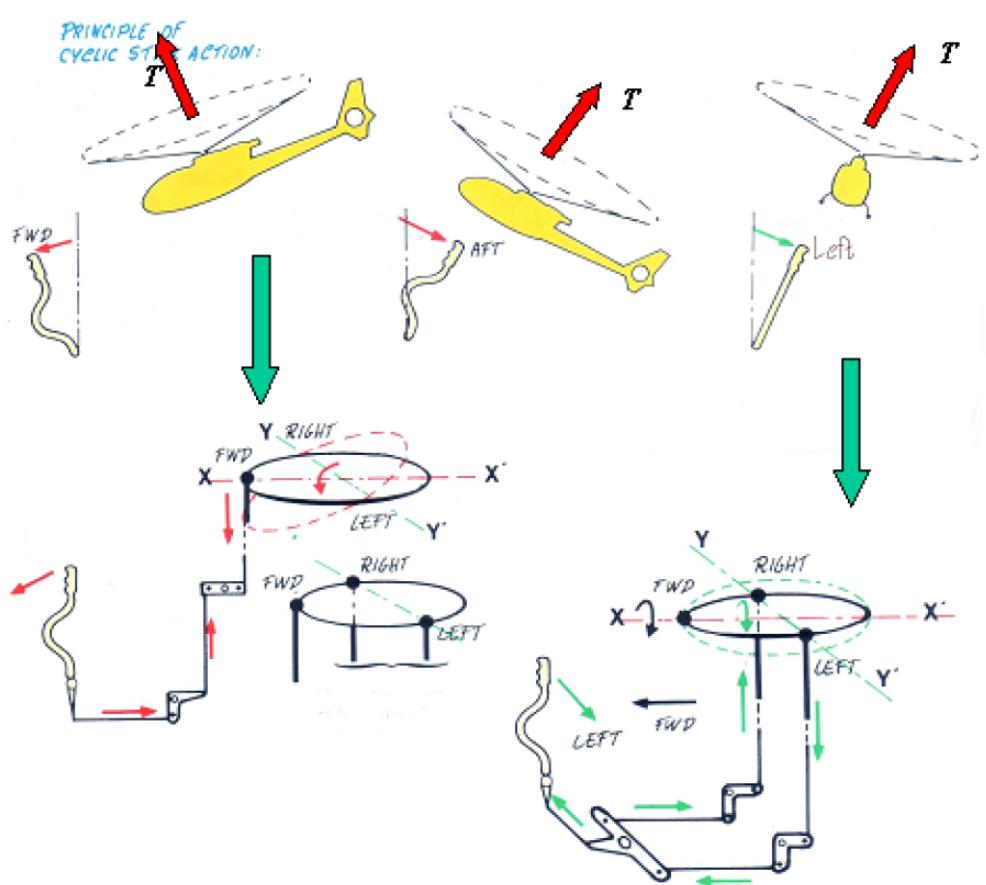


FIGURE 7 – Représentation schématique du contrôle longitudinal et latéral d'un hélicoptère, extrait de [Ral90].

3 Historique et technologies des commandes de vol

3.1 Les débuts du "plus lourd que l'air"

La naissance d'un mode de transport aérien motorisé "plus lourd que l'air" est associée au vol des frères Wright en 1903², sur la commune de Kitty Hawk (Caroline du Nord, Etats-Unis). Le pilotage des premiers avions de l'histoire se faisait simplement en déformant les ailes et autres surfaces de contrôle à l'aide de câbles. Le Morane-Saulnier *monoplane* présenté Figure 8, construit quelques années avant la première guerre mondiale, est un exemple d'avion dont le contrôle latéral se faisait en déformant les ailes (*wing warping*).

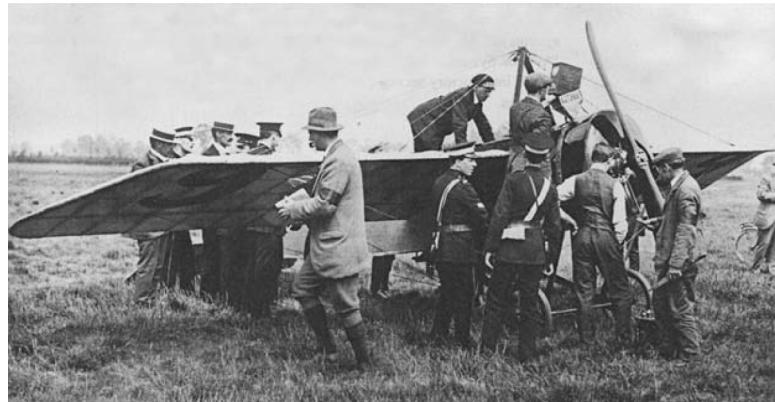


FIGURE 8 – Monoplan mono-moteur Morane-Saulnier en cours de ravitaillement avant une course en 1913.
Extrait de [MS08].

L'introduction de surfaces de contrôle mobiles eu lieu quelques années après (comme sur le biplan Avro 504 Figure 9), mais l'utilisation de câbles et de poulies perdura de nombreuses années. Afin de transmettre des efforts plus importants, des éléments de transmission mécaniques rigides et des systèmes d'engrenage peuvent être envisagés. Mais pour accompagner l'amélioration des performances des avions, des commandes de vol plus avancées sont devenues nécessaires.



FIGURE 9 – L'Avro 504 est un avion de combat utilisé pendant la première guerre mondiale. Le contrôle en roulis se fait à l'aide d'ailerons mobiles, à l'image des avions actuels. Image extraite de la page Wikipedia de l'avion.

3.2 L'assistance hydraulique aux efforts de pilotage

Avec l'augmentation de la vitesse des avions, et notamment l'approche des vitesses transoniques³, les efforts aérodynamiques sur les surfaces de contrôle sont devenus plus importants, et donc de plus en plus difficiles à compenser par la seule force du pilote. Le *Spitfire* (Figure 10) par exemple demandait des efforts de pilotage

2. L'ingénieur français Clément Ader était très proche d'y arriver lui aussi, certains récits pouvant même supposer que le premier vol avait déjà eu lieu ! Il a en tous cas donné son nom à un institut de l'université de Toulouse, qui héberge notamment des travaux de recherche autour des commandes de vol.

3. L'américain Chuck Yeager est le premier à avoir officiellement franchi le mur du son en 1947 à bord du Bell X-1, dans le cadre du programme de recherche NACA (l'ancêtre de la NASA).

élevés et connaissait un "retournement" des commandes contre le pilote [MS08], phénomène qui était incompris au début.

L'augmentation de la taille des avions, permise par l'apparition de nouveaux moyens de propulsion (comme le *turbojet*⁴), a été un autre facteur d'augmentation des efforts de pilotage.



FIGURE 10 – Spitfire LF Mk IX immatriculé MH434, en vol en 2018. Photo extraite de la page Wikipedia de l'avion.

Des commandes de vol assistées par des actionneurs hydrauliques sont alors apparues. A l'image du freinage ou de la direction assistée d'une voiture, l'effort fournit par le pilote est amplifié par l'emploi d'une énergie externe.

La Figure 11 montre un exemple d'actionneur linéaire hydraulique. La commande du pilote est transmise mécaniquement à l'actionneur par l'intermédiaire d'une servovalve. Le fluide sous pression peut alors pénétrer dans l'une des deux chambres et provoquer un déplacement du piston et de la surface mobile qui y est attachée. Le *BAE Hawk 200* est un exemple d'avion dont la plupart des surfaces mobiles sont actionnées avec une assistance hydraulique (Figure 12)

On voit que pour fonctionner, ce type d'actionneur doit être connecté à l'un des réseaux hydrauliques de l'avion. Pour assurer la redondance nécessaire dans le cas d'une fonction critique (une fonction dont la perte empêche le pilotage de l'avion), l'actionneur peut-être connecté à un circuit hydraulique alternatif.

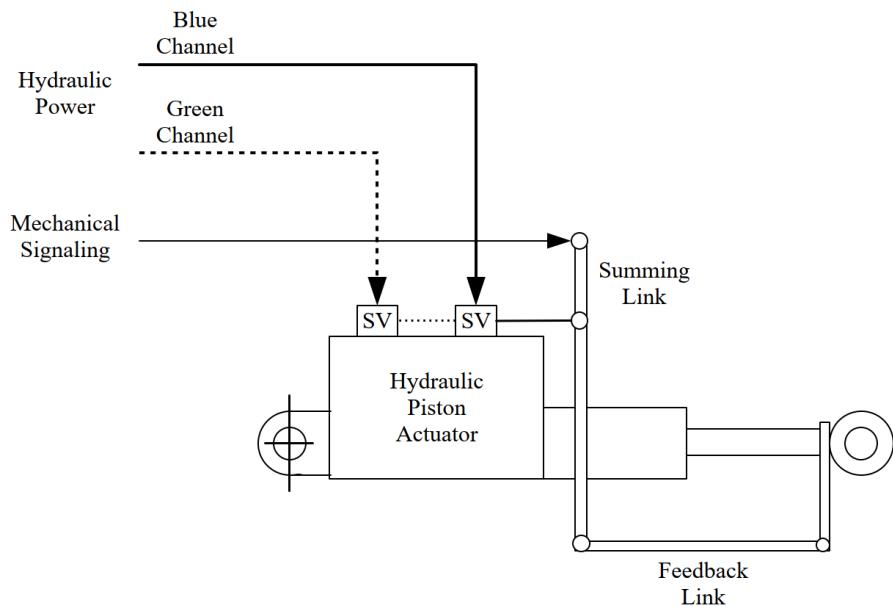


FIGURE 11 – Schéma d'un actionneur hydraulique dont la valve est commandée par une action mécanique du pilote. Extrait de [MS08].

Il faut noter que l'introduction d'une assistance eu un effet indésirable : le pilote ne "ressentait" plus pleinement les efforts imposés à la structure de l'avion. En séparant le ressenti du pilote des efforts réellement appliqués

4. L'invention du *turbojet* est attribuée à l'ingénieur anglais Sir Frank Whittle. Un brevet a été déposé en 1921 par le français Maxime Guillaumé pour une invention similaire, mais l'état de l'art ne permettait pas sa réalisation à l'époque. Quelques années après Whittle, l'allemand Hans von Ohain développa le premier moteur opérationnel.



FIGURE 12 – BAE Hawk 208 de la force aérienne malaisienne. Photo extraite de la page Wikipedia de l'avion.

pour piloter l'avion, le risque était d'engager des manœuvres avec des facteurs de charge trop élevés, auxquels la structure ne pouvait résister ! Pour palier à ça, il a été nécessaire d'imposer un retour d'effort artificiel dans le manche du pilote.

3.3 Laisser l'ordinateur de bord piloter : le *Fly-by-Wire*

Avec l'augmentation des performances d'autres difficultés sont apparues, notamment d'ordre aérodynamique. Des avions avaient par exemple tendance à déclencher un type d'instabilité qui couple une oscillation en roulis et une oscillation en lacet (le *roulis hollandais*). Cette instabilité étant dommageable pour le confort des passagers dans le cas d'un avion commercial (et à la visée et au guidage des armements dans le cas d'avions militaires), les concepteurs ont introduit des correcteurs. C'est l'apparition de l'électronique et d'un certain niveau d'automatisation dans les commandes de vol.

Ces autopilotes sont devenus capables de prendre en charge des tâches de plus en plus complexes, et de plus en plus critiques vis-à-vis de la sécurité des vols. Avec pour avantage la réduction de la charge de travail pour les pilotes. On peut citer par exemple la capacité d'atterrissement automatisée de la Caravelle de Sud-Aviation présentée Figure 13. Pour protéger le système des pannes et de l'endommagement des équipements, il est important de prévoir des redondances.



FIGURE 13 – Une ancienne Caravelle 12 d'Air Provence sur le tarmac du musée de l'air et de l'espace au Bourget. « La Caravelle est le tout premier avion de ligne à être suffisamment automatisé pour pouvoir décoller et atterrir de façon entièrement automatique. Le 9 janvier 1969, le premier atterrissage *Phase III* sans visibilité est réalisé à Orly par une Caravelle de la compagnie Air Inter avec cinquante-six passagers à bord ». Photo et citations extraites de la page Wikipedia de l'avion.

Arrivés à un certain niveau de maturité et de performance, il est devenu possible de retirer les liaisons mécaniques (câbles, tringles, poulies) entre le poste de pilotage et les actionneurs de commandes de vol. Le pilotage repose alors entièrement sur les équipements électriques et électroniques. Certains systèmes mêlaient initialement des équipements analogiques et digitaux (et conservait même un lien mécanique pour permettre un pilotage manuel en cas d'avarie). Comme par exemple le *Panavia Tornado* (Figure 15), de conception européenne et toujours en service en 2021. Il est devenu possible avec le temps de concevoir des systèmes entièrement digitaux *fly-by-wire*.

La Figure 14 montre le schéma de principe d'un actionneur hydraulique commandé électriquement (*Servo-Hydraulic Actuator* ou SHA). Pour simplifier une seule voie de commande est représentée, mais en pratique on peut trouver quatre voies identiques[MS08] (*quadruplex*) pour assurer la redondance. Les commandes en position sont envoyées par le contrôleur de commandes de vol aux servo-valettes. Les positions de ces servo-valettes ainsi que la course des actionneurs sont mesurées (par des *linear variable differential transformer* ou LVDT) et renvoyées au contrôleur pour fermer la boucle.

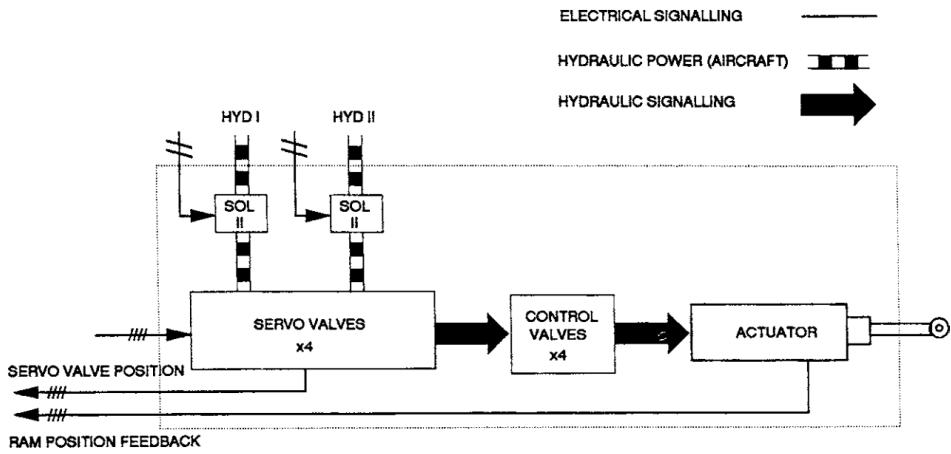


FIGURE 14 – Diagramme de principe d'un actionneur hydraulique commandé électriquement. La redondance porte à la fois sur la commande mais aussi sur la puissance hydraulique, avec la connection à deux réseaux de bord. Extrait de [MS08].



FIGURE 15 – Pour améliorer la prise en main de l'avion, les commandes de vol du Tornado proposent un retour d'effort artificiel au pilote. Cette réponse artificielle s'ajuste automatiquement à la position des ailes, l'altitude ou le chargement en équipements et munitions. Photo extraite de la page Wikipedia de l'avion.

On peut voir deux avantages majeurs à l'introduction du fly-by-wire. Le premier est la réduction du poids lié au remplacement d'équipements de transmission mécanique par des câbles électriques. Plus que tout autre type moyen de transport, les véhicules aériens sont extrêmement sensibles au paramètre poids, qui fait l'objet d'une attention toute particulière pendant la conception.

Le second avantage est la possibilité d'améliorer grandement la maniabilité de l'avion. Le cas extrême étant les avions de chasse de conception moderne. De nature instable, ils seraient impossible de les maintenir en vol plus de quelques secondes sans l'aide des commandes de vol fly-by-wire⁵.

Cette technologie a marqué les progrès d'Airbus dans sa guerre commerciale contre Boeing. En 1988, l'Airbus A320 devient le premier avion de ligne à entrer en service avec des commandes fly-by-wire digitales (le Concorde, entré en service en 1976, ayant été le premier avion produit en série disposant de commandes fly-by-wire analogiques). Du côté des jets d'affaire, c'est Dassault Aviation qui a introduit le fly-by-wire à bord du Falcon 7X en 2005.

L'utilisation de logiciel à l'interface des commandes du pilotes et des gouvernes peut favoriser des erreurs de conception aux conséquences très importantes. Le constructeur américain Boeing, pour son 737 MAX (Figure 16, décide d'utiliser les commandes de vol fly-by-wire (et donc du logiciel) pour palier à des problèmes d'aérodynamique externe, engendrés par le montage de nouveaux moteurs sur un fuselage de conception an-

5. Pour en savoir davantage, le lecteur est invité à suivre ce cours autour des commandes de vol de l'avion de combat F-22, mis à disposition par MIT OpenCourseWare



FIGURE 16 – 737 MAX 8 de la compagnie Ethiopian Airlines. C'est l'avion qui a été impliqué dans l'accident du vol ET302. Photo prise par un *spotter* et disponible sur Flickr.

cienne. Dans un programme sous pression, financière et calendaire, Boeing pense ainsi à limiter le besoin en formation des pilotes. L'idée est de leur permettre de piloter le 737 MAX comme un 737 d'ancienne génération, avec un ordinateur de bord (le *Maneuvering Characteristics Augmentation System* ou MCAS) qui « fait la traduction ». Le MCAS est inconnu des pilotes au départ, il n'est pas mentionné pendant leur formation. Cette conception a provoqué deux crashes, avant de voir l'avions cloués au sol pendant deux années pour procéder à une re-certification.

3.4 Vers des commandes de vol (encore) plus électrique : le *Power-by-Wire*

Après l'électrification des éléments de transmissions mécanique, c'est désormais le remplacement des circuits d'hydraulique de puissance qui est envisagé. Les avantages attendus sont, entre autres, une réduction de la masse, une meilleure intégration avec les autres composantes de l'avionique⁶, la possibilité de créer des redondances, la baisse des coûts de maintenance.

Lorsqu'ils sont alimentés par l'énergie électrique, les actionneurs peuvent être de type :

- électro-hydrauliques (*Electro-Hydrostatic Actuator* ou EHA) : de la puissance hydraulique est produite "localement" pour actionner la gouverne (Figure 17),
- électro-mécanique (*Electro-Mechanical* ou EMA) : la puissance électrique est directement utilisée pour provoquer un déplacement de la gouverne (Figure 18).

6. L'ensemble des équipements électroniques, électriques et informatiques qui aident au pilotage des aéronefs. Au delà des commandes de vol, on peut citer les radars, les instruments de navigation, de radiocommunication, etc.

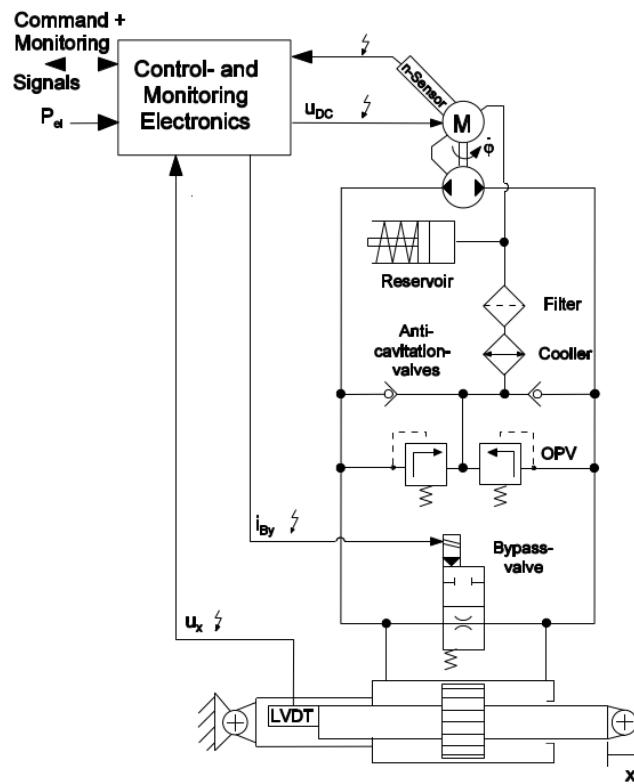


FIGURE 17 – Exemple d’EHA où un moteur électrique à courant continu entraîne une pompe dont la cylindrée est fixe. Extrait de [Fri97].

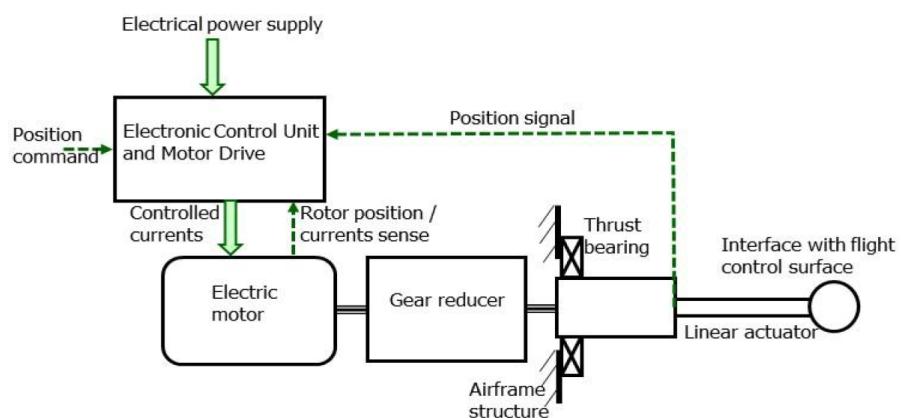


FIGURE 18 – Diagramme de principe d’un EMA. Extrait de [DJZ18].

3.5 Bilan et classification des actionneurs

La Figure 19 regroupe les différents types d'actionneurs mentionnés. La famille entourée en pointillés corresponds aux actionneurs dont la commande et la puissance sont électriques. C'est à cette catégorie que nous allons nous intéresser dans la deuxième partie du cours.

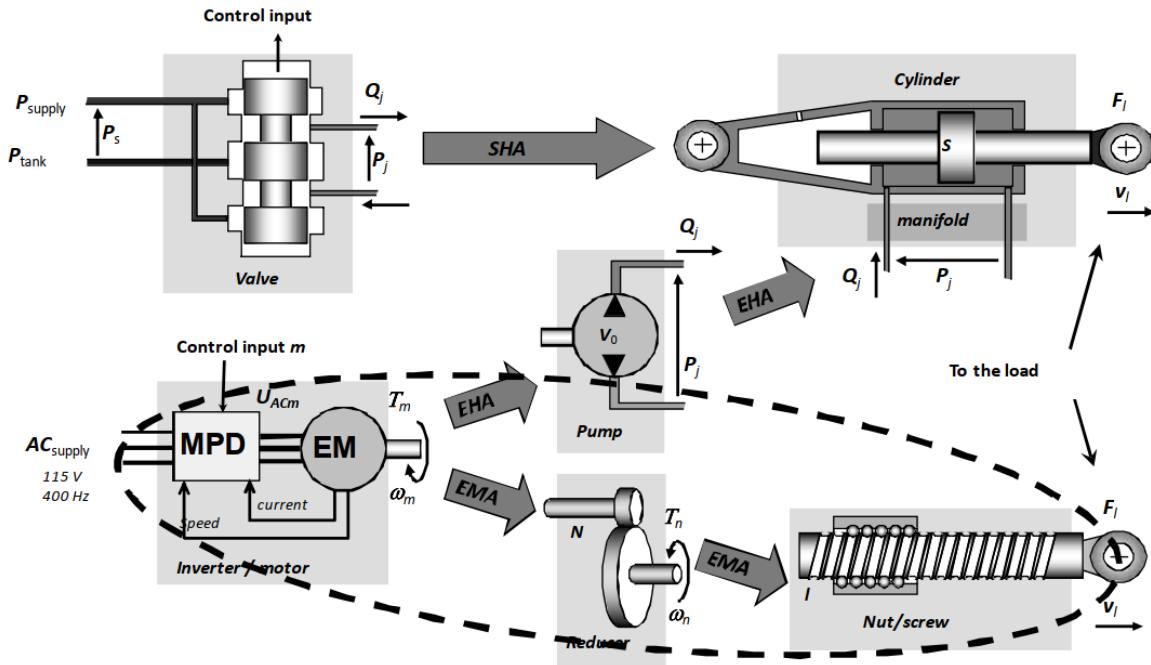


FIGURE 19 – Classification des actionneurs SHA, EHA et EMA. Extrait de [Mar].

Deuxième partie

Eléments de conception des actionneurs électromécaniques (EMA)

1 Principe de fonctionnement

1.1 Architecture

Un exemple d'architecture d'EMA est présentée en Figure 20. La puissance électrique est prélevée sur l'un des réseau de bord de l'avion. Dans cet exemple, il n'y a pas de rapport de réduction entre le moteur électrique et la tige filetée (*direct drive EMA*). D'autres architectures peuvent présenter un rapport de réduction pour réduire la vitesse de rotation et disposer d'un couple plus important.

Pour obtenir un déplacement en translation en sortie de l'actionneur, un organe de conversion mécanique est nécessaire. Dans l'exemple présenté Figure 20 c'est un assemblage vis-écrou qui est utilisé. Certaines conceptions utilisent une vis à billes, comme présenté dans [BJMS18]. Un bras de levier permet finalement d'entraîner la surface de contrôle en rotation.

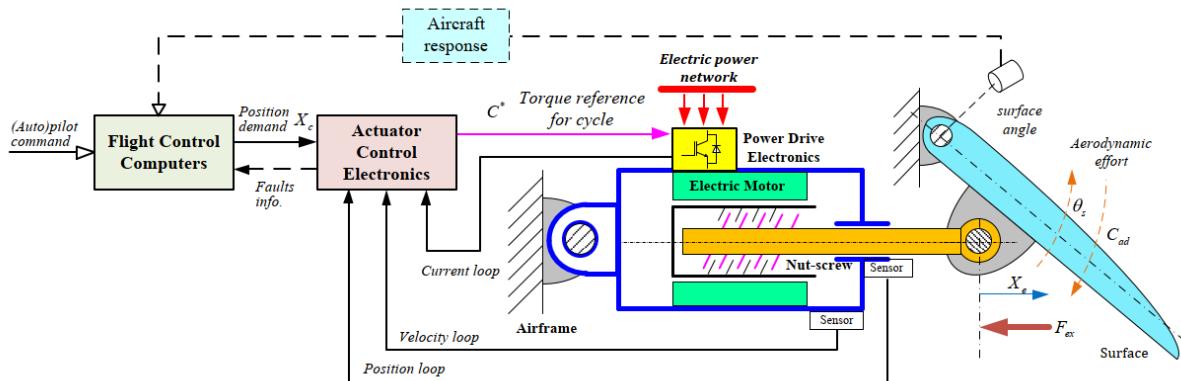


FIGURE 20 – Schéma d'une architecture d'EMA. Extrait de [Fu16].

1.2 Contrôleur (extrait de [Fu16])

La boucle de commande est chargée de réaliser la commande du pilote ou de l'autopilote, et de rejeter les perturbations issues des chargements aérodynamiques. Une architecture de contrôle classique est composée de trois boucles de régulation en cascade (Figure 21) :

- une pour le courant (*inner*),
- une pour la vitesse (*middle*),
- une pour la position (*outer*).

Si besoin, un capteur de force peut être ajouté pour améliorer la capacité à rejeter les perturbations.

La stratégie de contrôle est généralement basée sur une approche linéarisée et repose sur des correcteurs proportionnels et intégrals. Une attention particulière doit être apportée aux effets de l'ancrage à l'avion (*structural compliance*) et aux saturations (en tension, en courant).

2 Simulation multi-physique des EMA

Comme toute activité de modélisation, la compléxité du modèle d'EMA doit être adapté aux phénomènes que son auteur cherche à capturer. [Mar20] donne un exemple de représentation des différents composantes d'un modèle selon leur contenu fréquentiel (Figure 22).

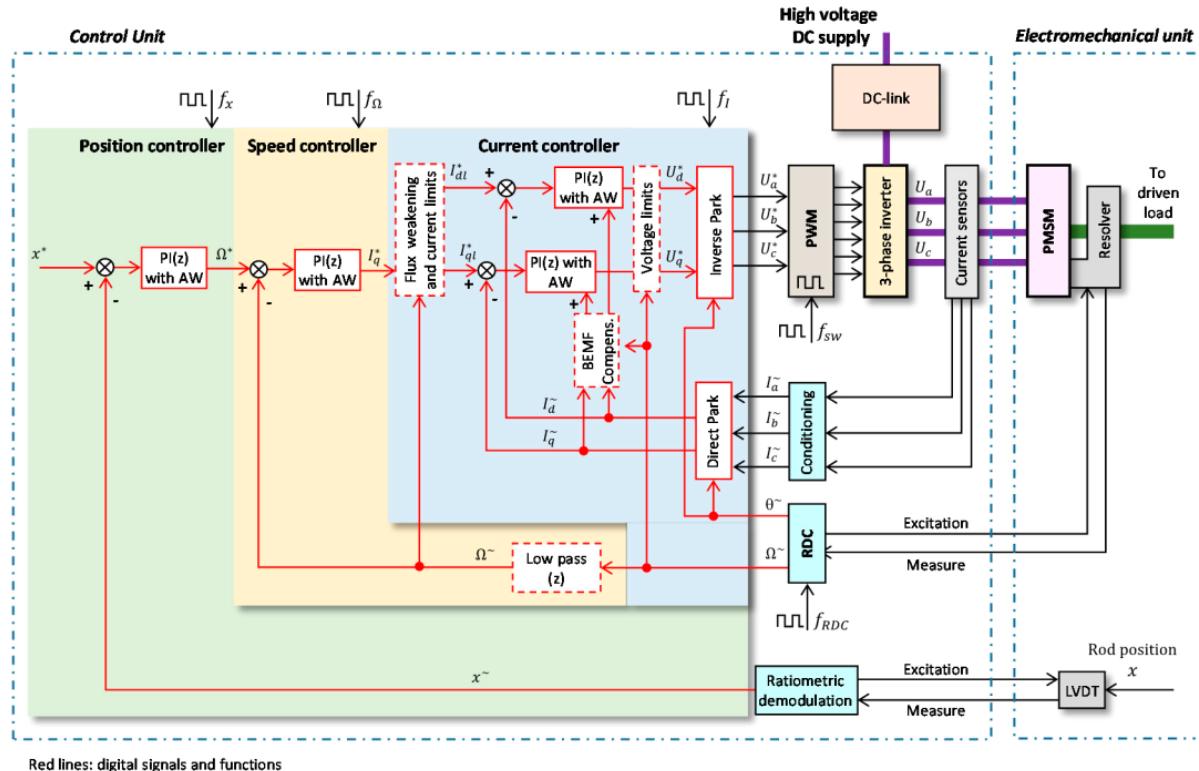


FIGURE 21 – Exemple d'architecture de contrôle d'EMA. Extrait de [Mar20].

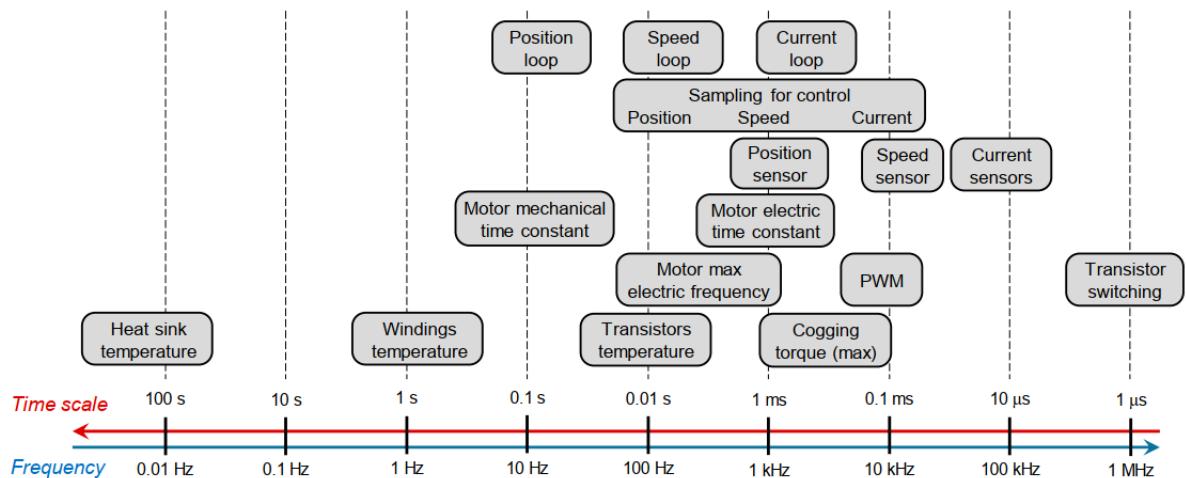


FIGURE 22 – Exemple d'architecture de contrôle d'EMA. Extrait de [Mar20].

Troisième partie

Perspectives

1 Autres applications aéronautiques des EMA

Comme évoqué en introduction, l'emploi des EMA est envisagé pour d'autres systèmes. On peut citer par exemple les actionneurs de train d'atterrisage, l'orientation des tuyères des moteurs fusée (*thrust vectoring*) ou l'actionnement des inverseurs de poussée.

2 Acteurs académiques et industriels

De nombreuses entreprises et laboratoires de recherche offrent des perspectives de carrières autour de l'électrification des aéronefs, et les EMA en particulier. Dans la région Rhône-Alpes, on peut citer par exemple :

- Dassault Aviation est implanté à Argonay pour la fabrication d'équipements mécaniques, hydrauliques et électriques destinés aux commandes de vol.
- Lord Solutions France, proche de Valence (Drôme), est un site dédié à la conception, la production et la maintenance de commandes de vol.

Siemens Digital Industries Software à Lyon développe et commercialise des outils de simulation et d'aide à la conception des systèmes complexes. L'un des outils, Simcenter Amesim, est particulièrement adapté à la simulation des systèmes multi-physiques comme les actionneurs de commandes de vol.

Plus loin de la région lyonnaise, de nombreux industriels oeuvrent sur les commandes de vol : on peut citer Umbra Group (Italie), MOOG et Eaton (Etats-Unis) ou Airbus Helicopters (Marignane, France).

Il faut également noter les possibilités intéressantes offertes par la recherche, et il faut particulièrement souligner les travaux de l'institut Clément Ader sur le site de l'INSA Toulouse.

Références

- [Ber08] Xavier Bertrand. *Modélisation Aérodynamique des Surfaces de Contrôle de la Voilure d'un Avion de Transport*. PhD thesis, Université de Toulouse. Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace, 2008.
- [BHC19] Marc Budinger, Ion Hazyuk, and Clément Coïc. *Modélisation Multiphysique des Systèmes Technologiques*. ISTE Editions, 2019.
- [BJMS18] Antonio Carlo Bertolino, Giovanni Jacazio, Stefano Mauro, and Massimo Sorli. High fidelity model for efficiency calculation of ball screws for flight control actuators. 2018.
- [DJZ18] Andrea Dellacasa, Giovanni Jacazio, and Alberto Zunino. Emadef : a fully comprehensive analytical tool for the initial design of electro-mechanical servo-actuators for primary flight controls. 2018.
- [Fri97] Stefan Frischmeier. Electrohydrostatic actuators for aircraft primary flight control - types, modelling and evaluation. 1997.
- [Fu16] Jian Fu. *Prototypage Virtuel Incrémental des Actionneurs Electromécanique pour la Synchronisation en Position*. PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse (INSA de Toulouse), 2016.
- [Mar] Jean-Charles Maré. Tutorial on virtual prototyping of mechanical transmission of aerospace actuators. R3ASC'18.
- [Mar20] Jean-Charles Maré. Practical considerations in the modelling and simulation of electromechanical actuators. 2020.
- [MS08] Ian Moir and Allan Seabridge. *Aircraft Systems*. Wiley, third edition, 2008.
- [NC10] Leland M. Nicolai and Grant E. Carichner. *Fundamentals of Aircraft and Airship Design. Volume I - Aircraft Design*. AIAA Education Series, 2010.
- [Ral90] Roger Raletz. *Basic Theory of the Helicopter*. Cepadues Editions, 1990.
- [Ser02] Airbus Customer Services. Getting to grips with aircraft performance. 2002.