

J'ai enfin retrouvé mon sujet d'ads :

Je vous mets le lien des 14 pages (j'ai eu de la page 1 à la page 10)

<https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/pedagogiques/14458/14458-etude-dun-actionneur-electroactif-pour-deformation-de-surface-portante-pour-optimiser-la.pdf>

# Étude d'un actionneur électroactif pour la déformation de surface portante pour optimiser la configuration aérodynamique d'un avion

Gurvan JODIN

Culture Sciences  
de l'Ingénieur

Édité le  
17/05/2022

école  
normale  
supérieure  
paris-saclay

*Cette ressource est issue d'une publication du numéro 105 de La Revue 3EI de juillet 2021. Gurvan Jodin est enseignant chercheur au département Mécatronique de l'École normale supérieure de Rennes.*

Le premier avion utilisait la déformation des ailes pour se diriger. Cette idée est toujours d'actualité pour adapter la géométrie des ailes et optimiser les performances aérodynamiques. Une approche particulière est d'intégrer les actionneurs directement dans la structure, l'utilisation de matériaux électroactifs est prometteuse. Une maquette de plaque déformable actionnée par un alliage à mémoire de forme est étudiée. Cet objet mécatronique peut servir d'application pédagogique en modélisation, simulation, manipulations expérimentales, ou encore en asservissements et instrumentation.

Cette ressource présente, après avoir justifié l'intérêt et les limites du changement de géométrie de l'aile durant le vol, quelques technologies d'actionneurs et de matériaux électroactifs puis propose une application pédagogique sur une plateforme expérimentale permettant l'étude d'un actionneur innovant.

## 1 – Introduction

Vu depuis la France, nous attribuons le titre de premier aéronef à l'Éole de Clément Ader à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle. Ce sont cependant les frères Wright aux États-Unis qui ont volé avec un aéronef réellement dirigeable au tout début du XX<sup>ème</sup> siècle. Ce qui est intéressant est que le contrôle du roulis de ce dernier est réalisé par la déformation (torsion) des ailes. Cela étant tout à fait possible par la force du pilote pour déformer une structure principalement en bois recouverte de toile tendue. Bien entendu, ce principe a été abandonné au profit de gouvernes rigides articulés sur des avions faits de structures plus rigides, comme c'est le cas aujourd'hui.

Avant la crise sanitaire du Covid-19, les activités commerciales du transport aérien étaient responsables de presque 4 % de l'émission des gaz à effets de serre, et cette part ne cesse de s'accroître [1]. Des efforts considérables ont été mis en œuvre et ont divisé par plus de 3 la consommation de carburant ces 50 dernières années [1]. Cet apparent altruisme écologique s'explique par des réalités économiques et concurrentielles. Les coûts d'opération sont très importants et un système permettant de diminuer un peu la consommation de carburant (qui représente environ 26 % du coût d'opération) est rapidement rentable dès lors qu'il ne nécessite pas de contraignantes et coûteuses opérations de maintenance. La concurrence entre les compagnies aériennes se propageant aux constructeurs aéronautiques qui doivent proposer les avions les plus performants, s'alignant ici avec les considérations environnementales.

Ainsi le secteur de l'aéronautique investit grandement dans la R&D, à la recherche de performance. Parmi les recherches actuelles, des projets cherchent à remplacer les gouvernes rigides articulées

traditionnelles et localisées par des ailes déformables motorisées. Pour ne citer que deux projets d'envergures, le concept VCCTEF [2] que je traduirais en volet de *bord de fuite à cambrure continûment variable* est un volet qui a le défaut de ne pas se détacher de l'aile mais a la grande qualité de ne pas former d'arête vive lors de son déploiement. Le second projet serait son équivalent européen avec le projet SARISTU [3] (*structures intelligentes pour aéronefs*) disposant aussi d'un volet déformable, mais également d'un bord d'attaque continûment déformable et d'articulations en élastomères.



Figure 1 : Essai du concept VCCTEF par la NASA (gauche), et démonstrateur du projet européen SARISTU (droite)

Je ne m'attarde pas d'avantages sur les différentes prouesses technologiques de ces projets. Je me suis inspiré de ma thèse de doctorat dans ce domaine pour vous proposer l'application pédagogique de cet article.

Premièrement, nous justifierons simplement le lien entre la performance aérodynamique, la masse de l'avion et la consommation de carburant. Notamment, nous verrons sommairement pourquoi changer la géométrie de l'aile pendant le vol a un intérêt, et dans quelles limites. Ensuite, nous verrons quelques exemples de technologies d'actionneurs et de matériaux électroactifs utilisés dans la recherche et développement aéronautique. Je ne pourrais résister de vous résumer mes travaux de thèse sur une maquette d'aile déformable actionnée par deux matériaux électro-actifs complémentaires ; avant de se focaliser sur une plateforme expérimentale qui fait à mon sens une bonne maquette pédagogique pour l'étude d'un actionneur innovant, de lois de contrôle, de modélisation électro-thermo-mécanique ou encore d'instrumentation électronique.

## 2 – Aérodynamique et performance

Tout d'abord, je pense qu'un petit rappel des bases de l'aérodynamique est important. La Figure 2 présente le bilan des forces sur un avion en vol. Il suffit d'appliquer la seconde loi de Newton sur l'équilibre des corps pour comprendre la suite. Pour voler à altitude constante, la portance doit compenser le poids  $P$ . Pour maintenir une vitesse constante, la poussée est égale et opposée à la traînée aérodynamique. La majorité de la portance  $L$  - effort qui porte l'avion - vient des ailes grâce à leurs formes et dimensions. La traînée  $D$  - qui freine l'avion - est en partie due aux ailes. Une donnée très utile est la finesse aérodynamique  $f$ . Il s'agit du rapport de la portance sur la traînée  $f = L / D$ . À géométrie et conditions de vol données, la finesse est constante.

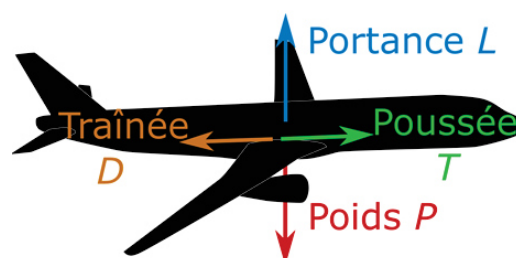


Figure 2 : Bilan des forces sur un avion en vol. Les moments ne sont pas représentés.

À altitude et vitesse constante, puisque la portance doit être opposée au poids  $P = -L$ , que la poussée  $T$  est égale et opposée à la traînée  $T = -D$  et que la finesse aérodynamique est fixe, la poussée est alors proportionnelle au poids de l'avion  $T = P / f$ . Sachant que les moteurs brûlent le carburant pour générer la poussée, la consommation de carburant est directement liée à la masse de l'avion. Pour approfondir, un très bon cours d'aérodynamique peut-être le livre de J.D. Anderson [4].

Maintenant, l'amélioration des performances aérodynamiques permet également de diminuer la consommation de carburant sans toucher à la masse. C'est la particularité des travaux dans la thématique du *morphing* (ou morphisme de structure) qui s'attaque à l'amélioration des performances aérodynamiques en permettant un changement de forme d'aile précis à chaque instant. Ceci permet en théorie d'avoir à chaque instant du vol la forme économisant le maximum de carburant. Pour comprendre cela, prenons quelques ordres de grandeur. Un Airbus A320 a une masse d'environ 80 tonnes lorsqu'il est chargé dont 40 tonnes de carburant. Durant son vol de plusieurs heures, l'avion s'allège en brûlant ses 40 t de carburant dans l'atmosphère. On comprend aisément que les meilleures ailes pour faire voler un avion de 40 t ne sont pas exactement les mêmes que celles d'un avion de 80 t. Pour autant ce sont les mêmes ailes qui portent l'avion, par construction. Dès lors adapter la forme de l'aile au fur et à mesure du vol permet d'optimiser les performances aérodynamiques. C'est ce que l'on appelle le *contrôle de configuration aérodynamique*.

Cette optimisation peut économiser du carburant à condition bien évidemment que la masse des systèmes d'actionnement ajoutés ne détériore pas le bilan.

### 3 – Actionneurs et matériaux électroactifs

#### 3.1 - Actionneurs conventionnels

Les actionneurs aéronautiques permettent de commander les gouvernes et autres surfaces de contrôle. L'augmentation de la taille des avions nécessite une force plus importante sur les gouvernes. Ainsi les commandes manuelles ont évolué vers des actionneurs à assistance hydraulique. Les avions récents sont maintenant "fly-by-wire", où une interface électronique échange des informations entre le joystick du pilote et les actionneurs de gouvernes. Les actionneurs conventionnels des avions sont constitués d'actionneurs de type vérins. Deux ancrages à rotule relient la surface mobile de l'aile au boîtier du vérin par l'intermédiaire de tringleries. La Figure 3 représente le schéma d'une gouverne actionnée, quand la Figure 4 présente un actionneur électro-hydraulique d'un aileron d'Airbus A380.

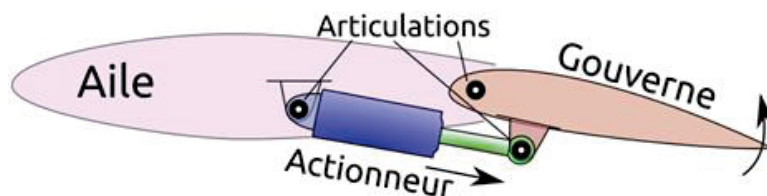


Figure 3 : Schéma d'illustration d'une gouverne et de son actionneur

Différentes technologies existent pour appliquer des forces et des déplacements à la tige, de l'hydraulique à l'électromécanique. Les actionneurs hydrauliques reposent sur un système hydraulique global, alimenté par les moteurs de l'avion. Malgré sa grande fiabilité, ce réseau hydraulique complexe et étendu est lourd et coûteux à entretenir. Une autre approche consiste à utiliser un circuit hydraulique local, alimenté par une pompe électrique. C'est le cas de l'actionneur de la Figure 4. L'un des principaux avantages de l'hydraulique est son comportement en cas de défaillance. En effet, en cas de défaillance de l'actionneur, la surface mobile se met en position

neutre en raison de la charge aérodynamique et l'huile en mouvement dans le cylindre fournit un amortissement suffisant pour éviter toute dangereuse instabilité dynamique fluide-structure.

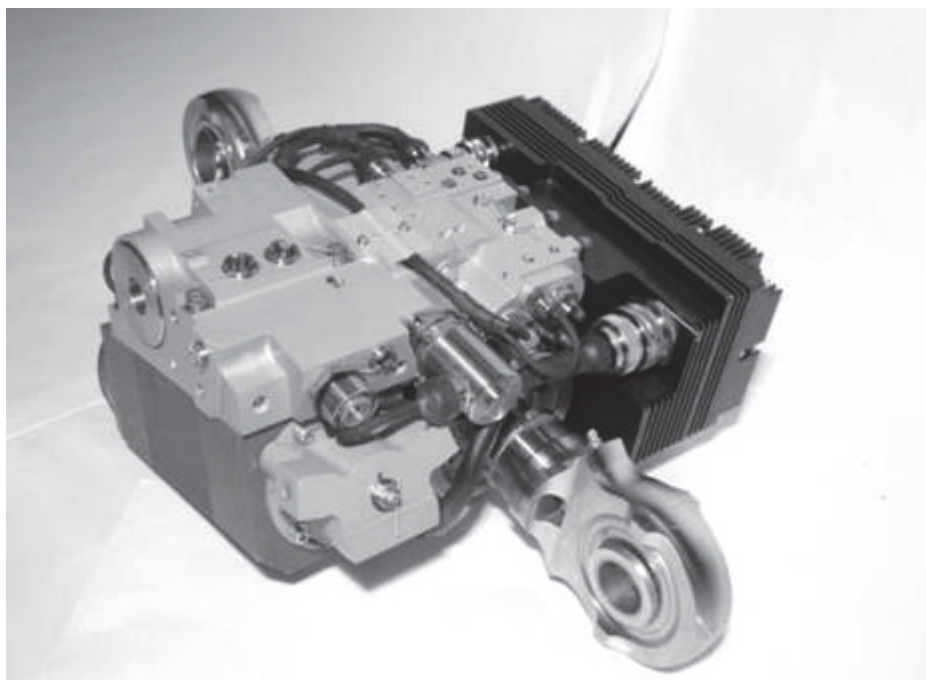


Figure 4 : Actionneur électro-hydrostatique d'un A380

Les actionneurs les plus récents sont électromécaniques. Ils n'utilisent pas de circuit hydraulique. Ils sont généralement composés d'un moteur électrique tournant à haute vitesse, d'un réducteur et d'une vis à billes pour transformer la rotation en translation de la tige du cylindre. Les avantages sont une masse réduite et une maintenance plus facile, mais la gestion thermique doit être sérieusement prise en compte. Le principal inconvénient est qu'une défaillance mécanique peut bloquer la surface de contrôle dans une position donnée, ce qui n'est pas tolérable pour les fonctions critiques. La mise en œuvre d'actionneurs électromécaniques partout sur un avion nécessite une approche système et une redéfinition des fonctions.

### 3.2 - Matériaux électroactifs pour actionneurs

Après le rapide survole du monde des actionneurs aéronautiques conventionnels, regardons quelques matériaux électroactifs qui ouvrent de nouveaux horizons aux actionneurs aéronautiques. Un matériau électroactif est un matériau « intelligent » contrôlé par un stimulus électrique. Autrement dit, ce sont des matériaux conçus pour réaliser une conversion directe d'énergie électrique en énergie mécanique. On en recense plus d'une douzaine qui se contractent, s'allongent, se tordent, durcissent ou frottent sous la stimulation d'un champ électrique ou magnétique, d'un courant d'une tension ou d'un échauffement provenant de l'application d'un courant électrique. C'est avec regret que je ne les cite pas tous ici, mais ma thèse de doctorat [5] les présente avec des sources pour aller plus loin.

Les deux les plus couramment utilisés pour leurs performances sont les céramiques piézoélectriques et les alliages à mémoire de forme. Les premiers se présentent sous la forme de barreaux ou de patches encapsulant le matériau piézoélectrique et des électrodes. Soumis à une tension électrique, les déformations sont de faibles amplitudes mais très rapides avec des efforts importants. Ils permettent par exemple de faire vibrer ou absorber des vibrations. Cependant leur mise en œuvre à des fins pédagogiques est délicate, car 1) il faut les alimenter sous plusieurs centaines voire des milliers de Volts, ce qui est dangereux et 2) les déformations étant faibles (moins de 0,1 % de changement de longueur), ils nécessitent des assemblages mécaniques de précision pour amplifier les déformations.

C'est pourquoi je propose de nous concentrer sur les alliages à mémoire de forme (AMF) pour une application pédagogique. Typiquement, il s'agit de fils en alliages de nickel et de titane, abordables, dont certaines variantes sont utilisées en orthodontie pour redresser les dents grâce à leur propriété de super-élasticité... D'autres nuances sont dites à « mémoire de forme » (attention de ne pas se tromper lors de l'achat du matériau). Un changement de température d'environ 30°C déclenche un changement de phase cristalline, ce qui revient à passer d'un métal à un autre qui ont tous deux des propriétés mécaniques très différentes. Ainsi l'alliage froid - dit martensitique - est très ductile et se déforme avec peu de résistance, alors que la phase chaude - austénitique - est élastique et peut générer de grands efforts pour retrouver la forme originelle. Ces alliages ont les noms commerciaux *Flexinol* ou *Nitinol*. Ils sont capables de s'allonger jusqu'à 8 % de leur longueur initiale et de supporter 600 MPa de contrainte, pour un échauffement entre 30°C et 70°C.

La Figure 5 présente des essais de tractions sur un fil de *Nitinol* de 1 mm de diamètre. Il est illustré qu'avec un ressort accroché en face, on peut en contrôler l'allongement en changeant la température du fil.

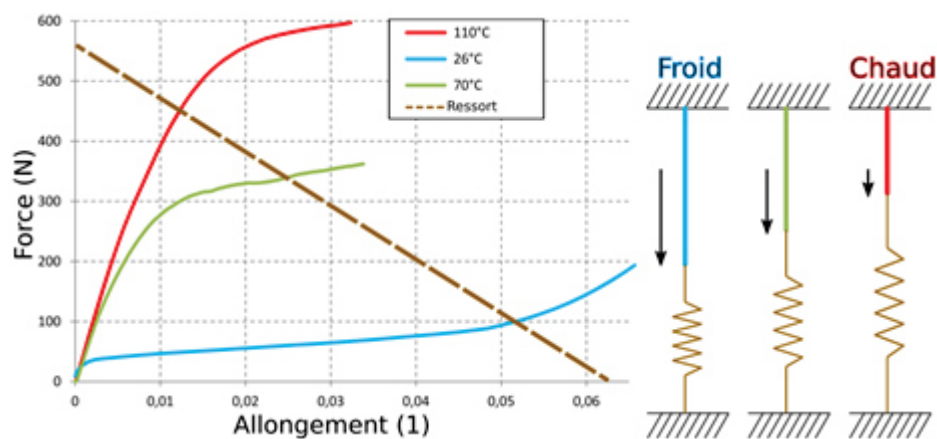


Figure 5 : Caractéristique force/déformation d'un fil de Nitinol, et illustration d'un actionneur fil-ressort

Il suffit de les parcourir par un courant électrique pour qu'ils s'échauffent. Ainsi, un fil de 1 m de long et 1 mm de diamètre peut soulever une masse suspendue de 45 kg sur 8 cm ! Simples, silencieux, sans pièces mobiles intermédiaires, avec de grandes déformations et forces, ils ont tout pour faire de bons actionneurs. Ce serait néanmoins malhonnête de ne pas évoquer des défauts comme leur comportement non linéaire, la phase d'entraînement du matériau, le vieillissement rapide en cas de forte sollicitation, le mauvais rendement en puissance convertie et la lenteur de l'actionnement (due au chauffage). Malgré ces défauts, ces matériaux peuvent s'intégrer directement et très légèrement dans les structures des ailes pour en contrôler la forme. Regardons maintenant un exemple.

#### 4 – Morphisme électroactif hydride

Comme je le laisse entendre, les travaux de recherche et de développement de structures volantes déformables utilisant des matériaux électroactifs sont nombreux et variés. J'invite encore une fois le lecteur curieux à regarder l'état de l'art de ma thèse pour y trouver des références [5]. Que ce soit pour de petits avions de modélisme ou des avions de ligne, le morphisme fait face au paradoxe d'avoir une structure suffisamment flexible pour être déformée mais suffisamment rigide pour supporter les chargements aérodynamiques sans se déformer. Utiliser des matériaux électroactifs directement dans la structure apporte des éléments de réponse à ce paradoxe. Un érudit avec sa casquette d'aérodynamicien expert en turbulence m'a dit un jour que le morphisme c'est de donner une petite déformation de géométrie pour obtenir de grands effets aérodynamiques. En effet, ne

nous méprenons pas, le but du morphisme est d'agir sur l'écoulement, déformer la structure n'est pas une fin en soi.

C'est par ce constat que les travaux auxquels j'ai participé au laboratoire LAPLACE (génie électrique) et à l'institut IMFT (mécanique des fluides) à Toulouse trouvent leur originalité : hybrider les matériaux électroactifs pour agir sur l'écoulement de plusieurs façons. Ainsi des déformations lentes mais de grandes amplitudes sont réalisées par des alliages à mémoire de forme (AMF), quand des vibrations rapides de petites amplitudes sont provoquées au bord de fuite par des patches piézoélectriques. Les grandes déformations adaptent la finesse de l'aile aux conditions de vol, quand les vibrations ajoutent de l'énergie à une certaine fréquence dans la couche de mélange des écoulements venant du dessus et dessous de l'aile. Ces changements de formes rapides d'amplitude 1/1000 de la taille de l'aile agissent sur la turbulence et modifient sa cohérence dans tout le sillage et des améliorations de performances aérodynamiques de plusieurs % ont été observées. La Figure 6 est un photo-montage illustrant la maquette de soufflerie avec des couleurs représentant visualisations expérimentales et simulations numériques de l'écoulement. La partie arrière est actionnée par AMF et patches piézoélectriques et la trappe ouverte laisse apparaître l'électronique de commande de cette fascinante expérience pour le sujet passionnant qu'est l'étude du morphisme électroactif hybride.

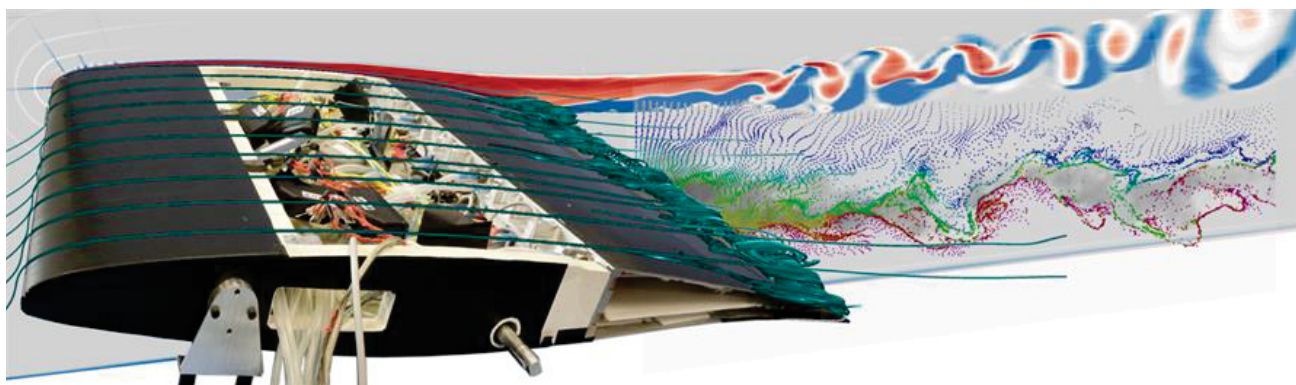


Figure 6 : Photomontage illustrant la maquette de soufflerie pour le morphisme électroactif hybride

Il est maintenant plus que temps d'en venir à l'application pédagogique de cet article. Mais cette introduction est nécessaire pour comprendre la suite. L'étude et la conception de cette maquette de 60 cm de long avec son bord de fuite courbé actionné par AMF n'est pas simple, et une petite maquette a été réalisée, instrumentée, modélisée et testée. Il s'agit de l'objet d'étude dans la suite de cet article.

## 5 – Application pédagogique : plateforme expérimentale pour alliages à mémoires de formes répartis en surface

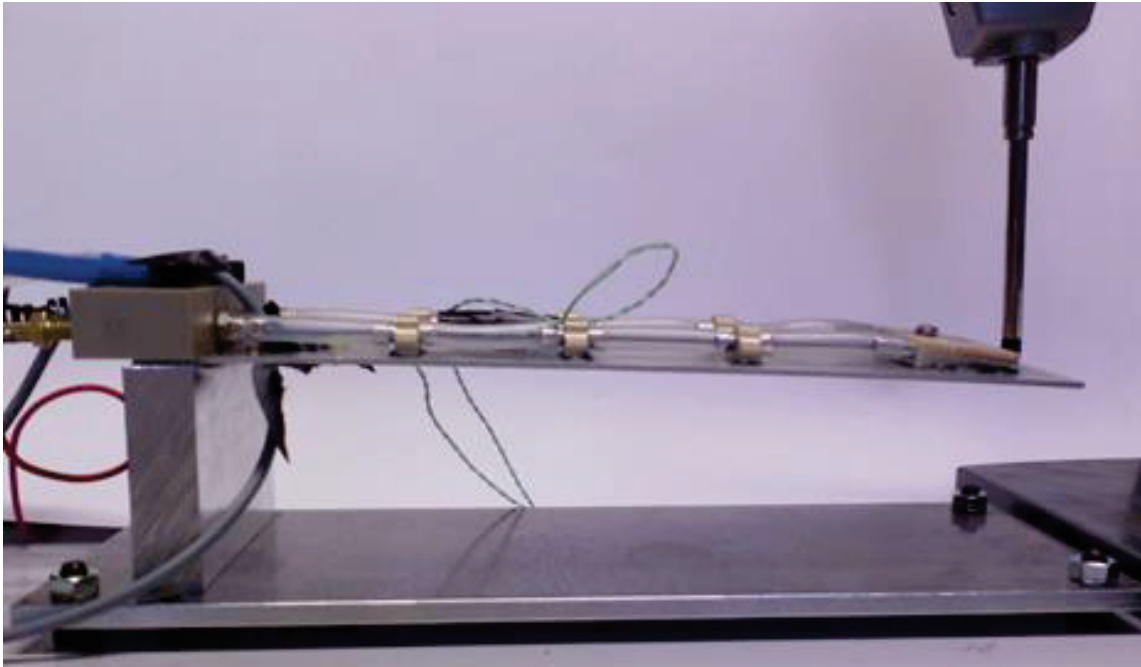
La suite s'inspire de l'article [6] que j'ai coécrit. Une plaque en porte-à-faux sur laquelle courent des AMF a été réalisée. Ce prototype aide à la conception du prototype de morphisme d'aile. En effet, son but est de tester les capteurs et actionneurs et de développer les boucles de contrôle. Un modèle électro-thermomécanique du système est développé et validé à l'aide de cette plaque fléchissante.

### 5.1 - Description du dispositif

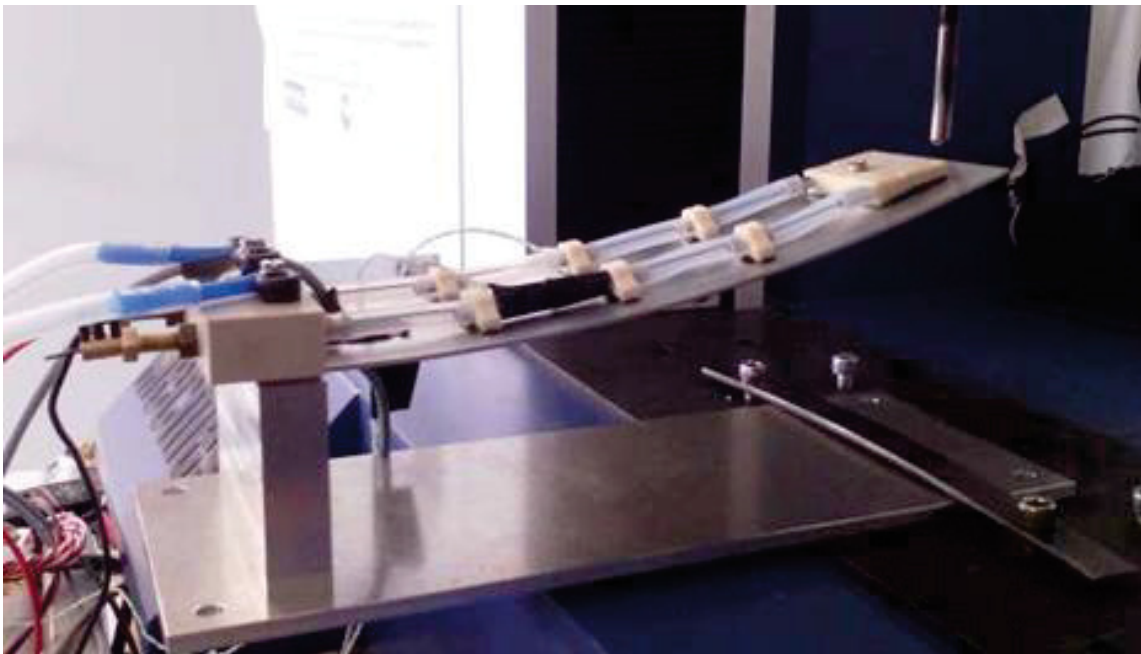
Le dispositif étudié consiste donc en une plaque en alliage d'aluminium de 1 mm d'épaisseur, longue de 20 cm et large de 7 cm. Un fil d'AMF parcourt un aller-retour le long de la surface supérieure, et est maintenue à 5 mm du dessus de la plaque par des bouts de tubes métalliques glissés dans des entretoises imprimées en 3D et collées à la plaque. Le fil est ancré à une extrémité

au travers deux vis creuses permettant de régler la tension de ce dernier. Ceci sert à précontraindre l'AMF froid pour lui permettre de se tendre lorsqu'il est chauffé, et ainsi générer un moment fléchissant sur la plaque qui vient la faire fléchir : le dispositif se déforme. Le tout est monté sur un support permettant de poser simplement l'ensemble sur une table ou paillasse de laboratoire.

Les Figures 7 et 8 présentent la plaque au repos (AMF froid) et lors de l'actionnement (AMF chaud). La flèche en bout de plaque peut atteindre 40 mm !



*Figure 7 : Dispositif au repos*



*Figure 8 : Dispositif actionné*

L'actionnement est géré par une alimentation de laboratoire, ici une Delta SM 400-AR-8 qui est contrôlable depuis un PC ou par signal MLI, mais une alimentation de moins de 8 A pour moins de 10 V avec un relais statique ou un hacheur fait tout aussi l'affaire. Nous avons encapsulé l'AMF dans un tube en silicone et utilisé une électrovanne sur l'air comprimé pour avoir un refroidissement forcé, mais il s'agit d'une option non nécessaire au fonctionnement de la maquette.



## 5.2 - Instrumentation

Plusieurs capteurs instrumentent la maquette et tous ne sont pas nécessaires en fonction de l'activité visée. Ainsi, un thermocouple mesure la température de l'AMF. Des jauges extensométriques sont collées sur la plaque dessus et dessous pour mesurer les déformations de la plaque ; et de plus un comparateur numérique vient mesurer le déplacement en bout de plaque. Les mesures de la tension et du courant dans l'AMF sont faites pour estimer puissances et variations de résistance.

Pour acquérir et agir sur le dispositif, nous avons testés deux configurations : une carte d'acquisition LabJack qui interface thermocouple, jauges de déformations, relais et électrovanne au PC ; ou une carte Arduino avec des amplificateurs dédiés (d'instrumentation, des « Shields » commerciaux ou encore des montages électroniques simples) pour interfacer les jauges de déformation, la mesure de température et le contrôle de l'électrovanne et de l'alimentation de l'AMF. Le comparateur numérique est relié directement au PC via une liaison série. Les deux configurations fonctionnent très bien, la version Arduino avec les petites cartes commerciales d'interface capteur par exemple de marque Adafruit sont aujourd'hui abordables et simples d'utilisation pour un montage avec les étudiants. Cela permet d'obtenir une fréquence d'échantillonnage d'environ 10 Hz, ce qui suffisant vis à vis de la dynamique relativement lente du système étudié. La Figure 9 illustre l'instrumentation de la plaque décrite jusqu'ici.

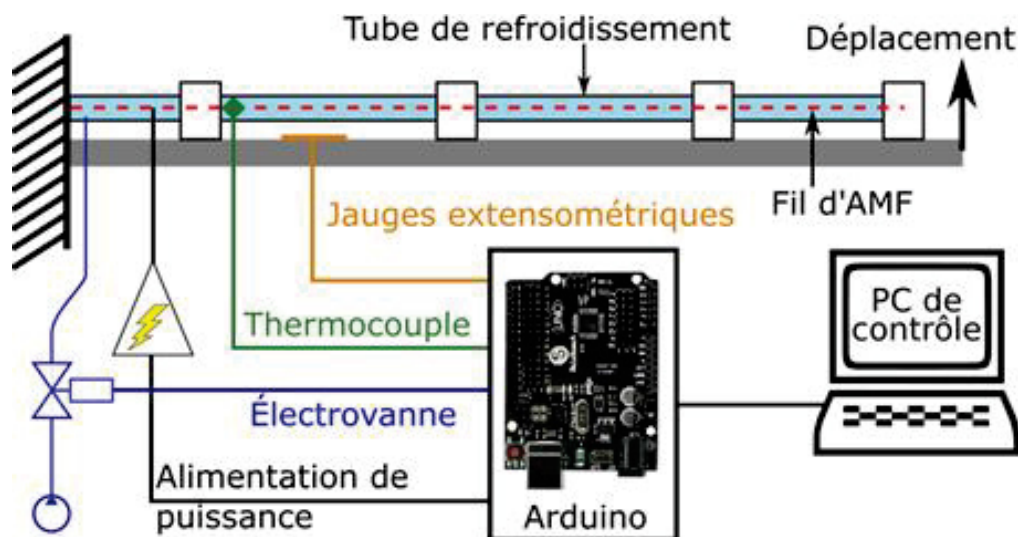
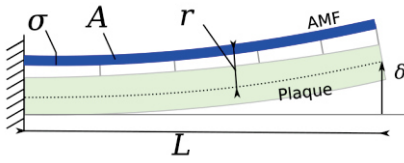


Figure 9 : Schéma synoptique du dispositif instrumenté

## 5.3 - Modélisation et simulation

Le modèle d'actionneur est basé sur le modèle phénoménologique de l'AMF développé par Elahini [7]. En raison du fait que les modèles phénoménologiques sont basés sur des quantités techniques facilement mesurées, ils sont privilégiés dans les applications d'ingénierie. Dans ces modèles, la dynamique de la transformation des phases au sein du matériau est décrite au moyen de variables internes et l'interdépendance de ces variables est modélisée par des équations cinétiques.

**Plaque déformable.** Le comportement structurel de la plaque est estimé par la théorie quasi-statique de la poutre d'Euler-Bernoulli qui modélise la contraction et l'extension de l'actionneur AMF comme un moment appliqué à une distance  $r$  de la fibre neutre de la poutre (ou plaque ici). Dans ce cas, la flèche  $\delta$  de la poutre peut être écrite :

$$\delta = \frac{\sigma \cdot A \cdot r \cdot L^2}{2 \cdot E \cdot I_g}$$


où  $\sigma$  est la contrainte dans l'AMF,  $A$  est l'aire de la section du fil AMF,  $L$  est la longueur de la plaque de la fixation au bout du fil, et  $E$  et  $I_g$  sont respectivement le module d'Young et le moment d'inertie de surface du substrat. Ceci nous permet de déterminer une constante de ressort équivalente  $k_{eq}$  pour l'utilisation dans le modèle de simulation.

**Transferts thermiques.** L'AMF est activé par chauffage par effet Joule. L'équation différentielle régissant le transfert de chaleur du fil est donnée dans l'équation suivante. Elle combine le chauffage par effet Joule avec la convection.

$$\dot{T} = \frac{1}{m_{SMA} \cdot c_p} (I^2 \cdot R - h_c \cdot A_c \cdot (T - T_\infty))$$

Dans cette équation,  $m_{SMA}$  est la masse du fil AMF,  $A_c$  est la surface du fil,  $I$  est le courant appliqué,  $c_p$  est la chaleur spécifique du matériau,  $T$  est la température de l'AMF,  $T_\infty$  est la température ambiante et  $h_c$  est le coefficient de convection thermique. Pour simplifier, la résistance  $R$  du fil est supposée constante.

**Transformation de phase.** La transformation de phase dans l'actionneur est régie par la fraction de martensite, qui doit être connue pour chaque instant dans le temps et peut être calculée en connaissant la température, la contrainte et leurs dérivés. En raison de la nature hystérétique des AMF, la description de leur comportement de transformation de phase dépend de l'état précédent du système. Si le système était précédemment à l'état d'austénite et qu'il passe à l'état de martensite, la transformation est appelée transformation directe (première équation ci-dessous). Dans le cas inverse, une transformation dite inverse a lieu, décrite par la seconde équation. Dans les deux cas, la transformation de phase est exprimée sous la forme de la dérivée temporelle de la fraction de martensite  $\xi$ .

$$\dot{\xi} = \frac{\xi_A - 1}{2} \sin(A_m \cdot (T - M_f + B_m \cdot \sigma)) \cdot (A_m \cdot \dot{T} + B_m \cdot \dot{\sigma})$$

$$\dot{\xi} = \frac{-\xi_M}{2} \sin(A_a \cdot (T - A_s + B_a \cdot \sigma)) \cdot (A_a \cdot \dot{T} + B_a \cdot \dot{\sigma})$$

Les variables  $\xi_M$  et  $\xi_A$  représentent respectivement la fraction de martensite au début de la transformation  $A \rightarrow M$  et  $M \rightarrow A$ .  $A_a$ ,  $A_m$ ,  $B_a$  et  $B_m$  peuvent être calculés via l'équation ci-dessous connaissant les propriétés du matériau.  $A_s$ ,  $A_f$  sont les températures de début et de fin de création d'austénite et respectivement  $M_s$ ,  $M_f$  sont les températures de début et de fin de la création de martensite. Les variations de température liées à la contrainte sont représentées par  $c_m$  et  $c_a$ .

$$A_a = \frac{\pi}{A_s - A_f} \quad A_m = \frac{\pi}{M_s - M_f} \quad B_a = \frac{-A_a}{c_a} \quad B_m = \frac{-A_m}{c_m}$$

**Équation constitutive.** Dernière équation de la série, la relation entre les différentes variables régissant le comportement des actionneurs est donnée par l'équation suivante, où  $E(\xi)$  est le module de Young,  $\epsilon$  est la déformation,  $\theta$  est le coefficient de dilatation thermique et  $\Omega(\xi)$  le tenseur de transformation.

$$\dot{\sigma} = E(\xi) \cdot \dot{\epsilon} + \theta \cdot \dot{T} + \Omega(\xi) \cdot \dot{\xi}$$

Enfin, la dernière hypothèse est que le comportement de création de la phase martensitique jumelle, responsable de la déformation pseudo-plastique (l'aspect mou à froid) est ignoré. C'est à dire que le modèle est valable tant que le fil AMF est toujours sous contrainte mécanique lorsqu'il refroidit, ce qui est le cas ici puisque la plaque déformée maintient l'AMF sous tension.

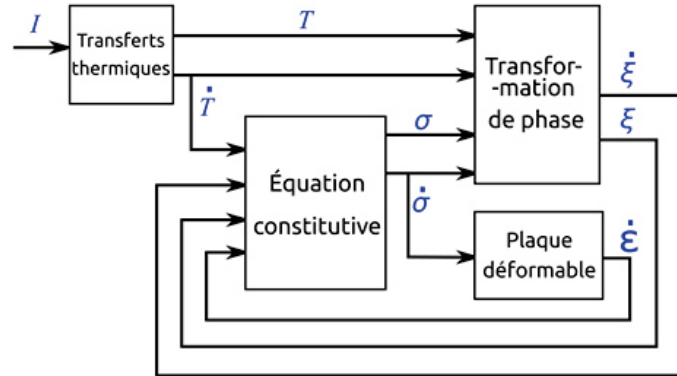


Figure 10 : Blocs du modèle de simulation

La simulation est réalisée à l'aide du logiciel Matlab/Simulink. Le schéma fonctionnel du modèle combiné AMF-plaque correspondant au modèle précédent est présenté en Figure 10. Le modèle forme une boucle algébrique car le comportement de l'AMF dépend à la fois de la contrainte et de la température de l'actionneur. Par conséquent, une résolution itérative doit être menée.

Les paramètres ont été principalement tirés d'expériences précédentes ainsi que de la littérature et sont donnés dans le fichier de paramètres hébergé avec le modèle de simulation Simulink sur la plateforme GitLab. J'ai donc publié en libre accès les fichiers nécessaires à la simulation sur le lien suivant : <https://gitlab.com/gusj/code-article-amf-ssf/>

#### 5.4 - Résultats de simulation et d'expérience

Regardons maintenant les résultats expérimentaux, avant de les comparer avec les simulations.

L'actionneur est typiquement alimenté en cycle de chauffage puis refroidissement. La Figure 11 présente la déformation de la plaque pour un cycle de 45 s constitué de 10 s de chauffage puis de 20 s de refroidissement forcé. Ces temps sont cohérents puisque la dynamique du refroidissement est plus lente que celle du chauffage. Les 15 s de temps morts entre chaque répétition permettent la stabilisation du système entre chaque cycle. Ainsi, il est possible de moyenner les résultats sur les cycles. Les résultats de ce processus de calcul de la moyenne sont présentés en Figure 12a pour les mesures sans convection forcée et en Figure 12b pour les mesures avec convection forcée.

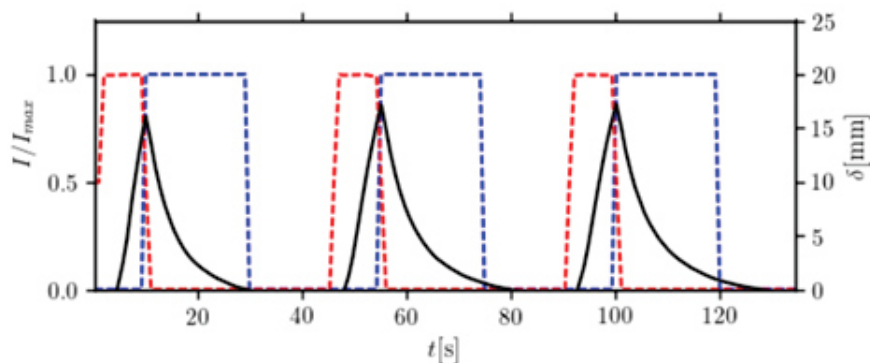


Figure 11 : Déformation expérimentale en bout de plaque (noir), courant de chauffage (rouge), activation du refroidissement (bleu), en fonction du temps

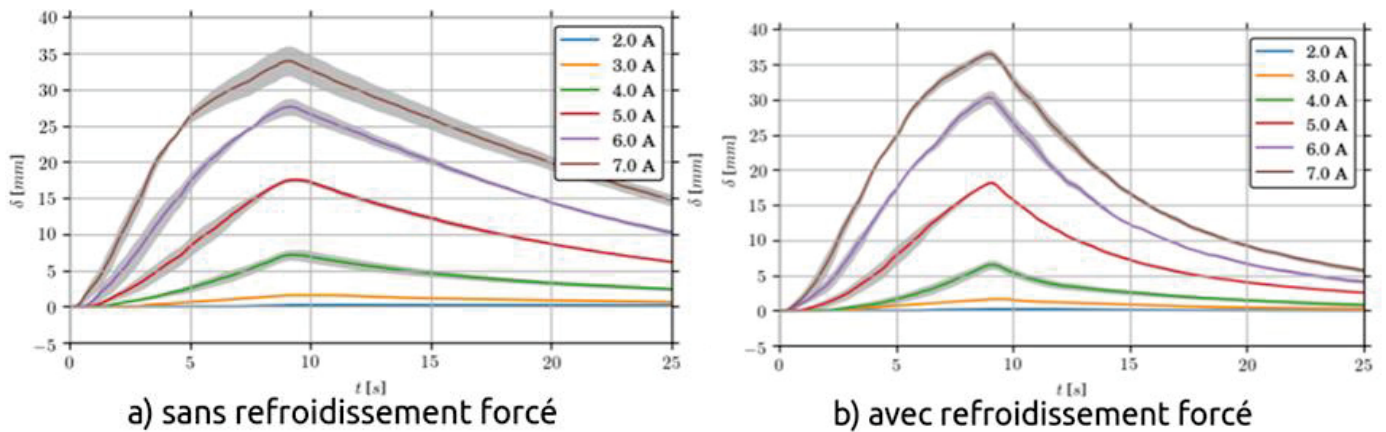


Figure 12 : Moyennes sur cycles des déplacements de la plaque pour différents échelons de courant :  
a) sans refroidissement forcé, b) avec refroidissement forcé

Deux choses ressortent en comparant les graphiques : premièrement, comme prévu, la convection forcée améliore considérablement le temps de cycle, ce qui permet un déclenchement plus rapide ; deuxièmement, les mesures effectuées à des intensités de courant plus élevées présentent un écart-type nettement plus important et une déviation maximale réalisable plus faible. Si cela semble contre-intuitif, c'est en fait plus dû aux caractéristiques thermiques du système qu'aux caractéristiques des AMF. On voit alors l'impact de l'amplitude de l'échelon de courant sur le déplacement de la plaque.

Des comparaisons entre expériences peuvent ensuite être dressées. La Figure 13 présente les moyennes expérimentales avec les résultats de simulation, toujours pour différents échelons de courant. À faibles et forts courant il y a beaucoup de similarités, mais on observe une différence notable pour 6 A. Ceci peut être expliqué en regardant les températures et si ces températures semblent proches, un écart dans le modèle au niveau des températures de transformation peut expliquer les différences.

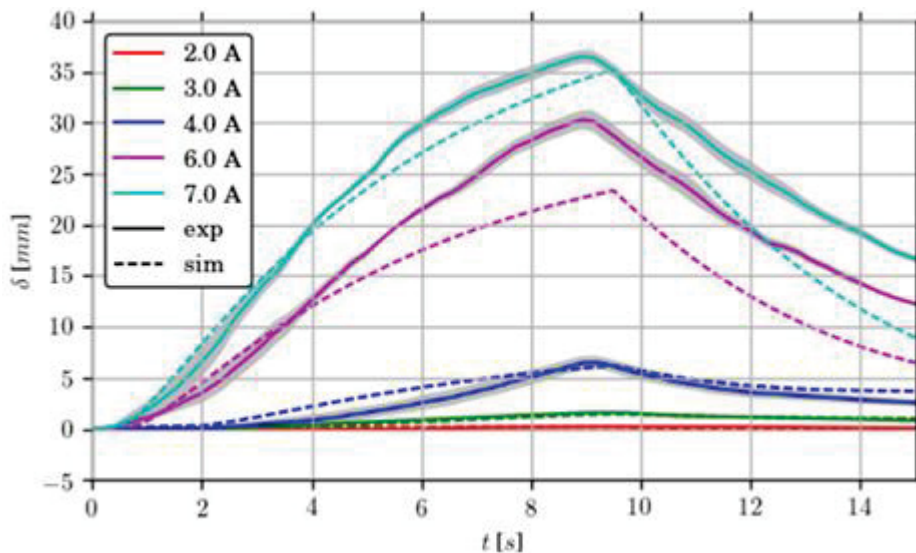


Figure 13 : Comparaison entre expériences (traits pleins) et simulations (pointillés) pour différents échelons de courant

## 5.5 - Asservissements

Dans cette dernière partie que je développe autour de cette maquette, des boucles d'asservissement sont implémentées pour contrôler la déformation de la plaque. Plus exactement, la déviation verticale de l'extrémité de la plaque est contrôlée par un correcteur proportionnel intégral (PI), commandant lui-même un autre correcteur PI de la boucle d'asservissement en

température de l'AMF. Cette structure imbriquée, présentée en Figure 14, n'est pas sans rappeler la structure boucle de courant et boucle de vitesse/position du contrôle de machines électriques. Ceci étant possible car les dynamiques des deux boucles ont des cinétiques très différentes.

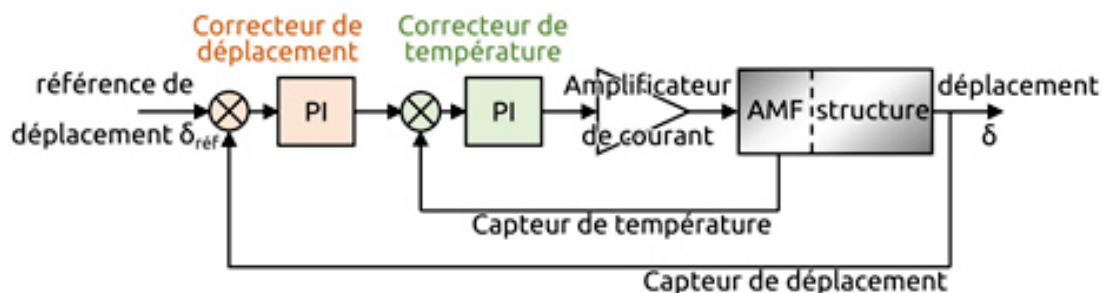


Figure 14 : Structure de l'asservissement de la plaque

L'implémentation de ces lois de contrôle nécessitent des capteurs. Le capteur de température est le thermocouple et son électronique, déjà intégrés dans la maquette. Pour mesurer la déformation, un comparateur numérique peut être utilisé, mais s'il n'y en a pas à disposition, ou dans le cas d'une application embarquée où l'on ne peut pas mettre de tels capteurs sur les ailes d'un avion, les jauges extensométriques collées sur la plaque peuvent être utilisées. Ce capteur « fait maison » nécessite un étalonnage. Le comparateur numérique se révèle très utile, mais une simple règle graduée peut suffire. Le relevé de la déformation de la plaque actionnée en fonction de la tension en sortie du pont de Wheatstone à jauges extensométriques est tracé en Figure 15, pour un grand nombre d'expériences représentées par les différentes couleurs. Je ne détaille pas le principe du capteur à jauges extensométriques, mais j'invite le lecteur à lire un très bon article des Techniques de l'ingénieur [8]. Le capteur présente une bonne linéarité pour des déformations inférieures à 17 mm, il peut donc être utilisé pour l'asservissement. La pente de la droite donne le gain du capteur en mm/mV.

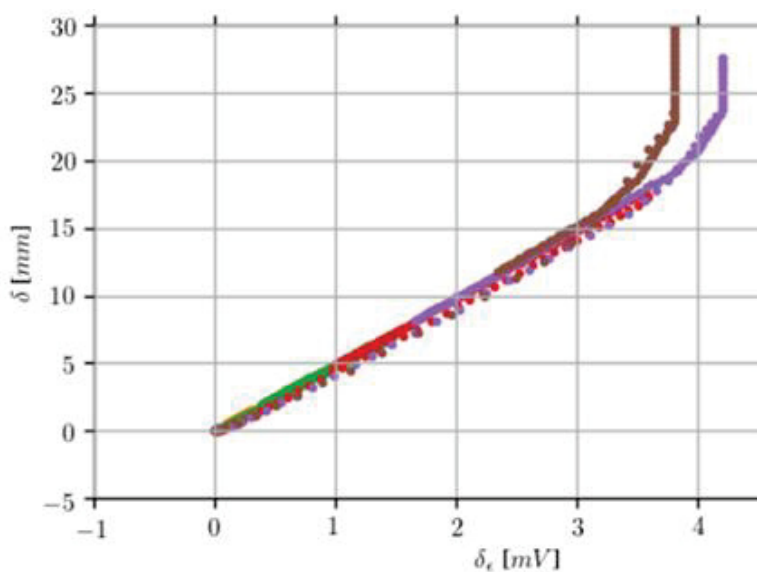


Figure 15 : Déformation de la plaque actionnée en fonction de la tension en sortie du capteur à jauges

Enfin, l'implémentation dans le microcontrôleur ou la carte d'interface avec le PC permet de réaliser l'asservissement et d'observer ces performances. La Figure 16 montre la réponse de la plaque à un échelon de 5 à 10 mm de déplacement. Devant la lenteur de la dynamique thermique et de l'hystérésis du matériau AMF, il est intéressant de regarder l'effet des saturations et limitation du correcteur intégral.

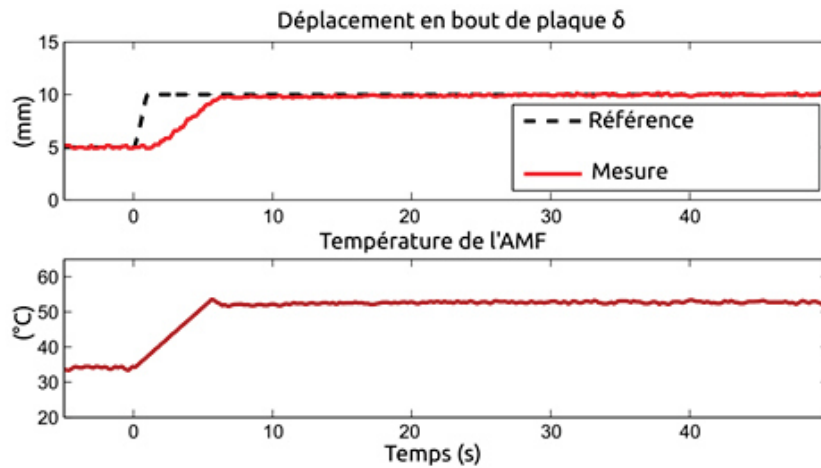


Figure 16 : Réponse de l'asservissement à un échelon de position

## 6 – Aspects pédagogiques

Avant de conclure, prenons un peu de recul sur le développement précédent plus scientifique que pédagogique. J'apprécie plus que de raison la plateforme expérimentale ci-dessus mais reconnaissons tout de même ses points forts : il s'agit d'un système complet dans un contexte d'innovation en aéronautique. Son étude est multiphysique : thermique, mécanique, électronique, science des matériaux, ... Il s'agit aussi d'un bon cas d'étude pour faire des simulations, mettre en œuvre un asservissement (simple ou en boucles imbriquées), concevoir et calculer des pièces mécaniques ou encore étudier l'instrumentation. Les aspects expérimentaux sont riches avec caractérisations, mesures et asservissements multiphysiques.

Je reconnais cependant que le niveau de difficulté pour appréhender la modélisation des non linéarités de l'alliage à mémoire de forme limite son étude poussée à un niveau académique au minimum en Master 1. La réalisation de la maquette nécessite aussi quelques précautions dans la conception et la mise en œuvre : les efforts dans le fil d'AMF sont importants et les ancrages doivent être isolés électriquement pour éviter les courts-circuits et permettre l'alimentation électrique. Ces contraintes m'ont imposé des pièces usinées ou imprimées dans des plastiques à hautes résistances mécaniques et thermiques (PEEK ou ULTEM). Cependant j'ai pris soin de présenter des alternatives dans la réalisation expérimentale de l'instrumentation en utilisant une carte d'acquisition ou des cartes de développement (Arduino) ; tous les capteurs (température ou déformation / déplacement) et actionneurs (électrovanne, alimentation commandable / relais / hacheur) ne sont pas indispensables.

Je pense ainsi que le modèle de simulation mis à disposition permet simplement d'étudier la modélisation du système et d'ajouter une boucle d'asservissement. Le système physique est mécatronique peut servir de support d'étude original à tous les niveaux post-bac, que ce soit pour un point particulier dans les domaines précédemment cités ou l'étude du système dans son ensemble.

## 7 – Conclusion

Le monde de l'aéronautique est fascinant pas son ingénierie. En un peu plus d'un siècle les progrès sont fantastiques et continus. J'ai pris l'angle des actionneurs et de l'optimisation aérodynamique par le morphisme et expliqué le contexte avant de présenter une maquette présentant des actionneurs innovants. Ces actionneurs basés sur des matériaux électroactifs ont fait l'objet d'un développement qui a nécessité une plateforme expérimentale constituée d'un prototype utilisable en enseignement. Cet objet mécatronique dépasse le domaine du génie électrique, mais les

résultats de modélisation, de simulations, d'expériences, de caractérisations et d'asservissements sont autant d'applications pédagogiques. Les fichiers de simulation sont publiés et je serai ravi d'échanger d'avantage quant aux détails de réalisation, de cette maquette que je trouve originale, démonstrative et passionnante.

## Remerciements

Je souhaite remercier mes encadrants de thèse de doctorat Jean-François Rouchon et Marianna Braza, car même après ces quelques années le sujet me passionne toujours. Je remercie également Hamid Ben Ahmed pour son aide dans la relecture de cet article.

## Références :

- [1] Page web Wikipedia « Impact climatique du transport aérien », versions française et anglaise.
- [2] E.J. Miller et al. "Evaluation of the Hinge Moment and Normal Force Aerodynamic Loads from a Seamless Adaptive Compliant Trailing Edge Flap in Flight". In: 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting. 2016.
- [3] C. Nagel et al. "Seamless Morphing Concepts for Smart Aircraft Wing Tip". In: Smart Intelligent Aircraft Structures (SARISTU). Springer, 2016, pages 275-291.
- [4] J.D. Anderson Jr. *Fundamentals of aerodynamics*. Tata McGraw-Hill Education, 2010.
- [5] G. JODIN. Hybrid electroactive morphing at real scale-application to Airbus A320 wings. 2017. *Thèse de doctorat*. <https://www.theses.fr/2017INPT0093>
- [6] G. Jodin, J. Scheller, E. Duhayon, J. F. Rouchon, M. Triantafyllou, M. Braza. "An Experimental Platform for Surface Embedded SMAs in Morphing Applications", *Solid State Phenomena*, Volume 260, pages 69-76, 2017, doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.260.69.
- [7] Mohammad Elahinia. "Effect of system dynamics on shape memory alloy behavior and control". PhD thesis. Virginia Tech, 2004.
- [8] J-L. LE GOËR, J. AVRIL. Capteurs à jauges extensométriques. *Techniques de l'ingénieur. Mesures et contrôle*, 1992, no R1860, p. R1860. 1-R1860. 23.