Écoulement en bord de fuite d'un profil NACA 4412 morphé par un actionnement hybride.

K.J. RIZZO[ab1], J. SCHELLER[ab2], G. JODIN[ab3], E. DUHAYON[a4], J.F. ROUCHON[a5], M. BRAZA[b6]

a. LAPLACE, Laboratoire Plasma et Conversion d'Energie, UMR CNRS-INPT-UPS
b. IMFT, Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse, UMR CNRS-INPT-UPS
[1]kjrizzo@laplace.univ-tlse.fr, [2]scheller@laplace.univ-tlse.fr, [3]jodin@laplace.univ-tlse.fr, [4]eric.duhayon@laplace.univ-tlse.fr, [5]rouchon@laplace.univ-tlse.fr, [6]marianna.braza@imft.fr

Résumé :

Cette étude se place dans le cadre du programme de recherche RTRA-DYNAMORPH (Dynamic regimes Electroactive Morphing) et concerne la mise en œuvre de concepts de morphing électro actif ('conformation'), basés sur l'hybridation d'échelles lente, moyenne et rapide opérant en régime dynamique sur un aileron d'aile d'avion déformable.
Ce document présente un nouveau prototype basé sur un profil d'aile NACA 4412 d'échelle intermédiaire. Il doit valider l'intégration d'actionnement innovants capables d'atteindre des amplitudes de déformations suffisantes pour influer sur la portance globale du profil à des fréquences d'activation aptes à interférer sur la création de structures tourbillonnaires tout en conservant une rigidité globale admissible face aux efforts aérodynamiques. La caractérisation et l'intégration de deux familles distinctes de matériaux actifs seront exposées. D'une part un alliage de NiTInol qui est uniformément réparti en surface de l'aile pour assurer les déformations les plus lentes à grande amplitude et d'autre part une architecture bimorphe de patch à Macro Fibre Composite (MFC) qui permet l'activation haute fréquence du bord de fuite. L'impact de ces deux actionnements couplés a été étudié en soufflerie au sein de l'IMFT. Les variations macroscopiques de portance du prototype ont été mesurées par une balance aérodynamique simultanément à une mesure des variations locales de pression en bord de fuite. Le comportement local de l'écoulement en aval de l'aileron a quant à lui été étudié par PIV. L'analyse des composantes normales et tangentielles du tenseur de contrainte de Reynolds met en évidence l'influence de la fréquence d'actionnement sur la formation de structures tourbillonnaires. L'analyse et la confrontation de ces différentes mesures fait l'objet d'une discussion pour conclure sur l'impact et les bénéfices de cette stratégie de morphing.

Abstract :

This study is part of the RTRA-DYNAMORPH (Dynamic regimes Electroactive Morphing) research program and presents the development of a new electro active morphing concept based on a hybridization of different spatial and temporal scales.
This article presents this new midscale prototype based on a NACA 4412 profile. The main goal of the developed prototype is to validate the integration of the innovative actuators able to reach large deformations and high frequencies of even under realistic aerodynamic loads. Characterization and

integration of two different families of materials will be investigated. In a first part the actuation by surface embedded NiTInol alloys is presented and in a second step MFC (Macro Fiber Composite) actuators capable of small and fast deformations will be introduced. Furthermore, the effects of the large-amplitude low frequency actuation modifying the airfoil's camber are investigated using aerodynamic force measurement at IMFT's wind tunnel. Particle image velocimetry (PIV) measurements are conducted at the MFC actuated trailing edge in order to investigate the physical effect on the flow of the high-frequency low-amplitude forcing. A statistical analysis of these results reveals the reduction of the Reynolds stress tensor components with increasing actuation frequency up to a frequency of 60 Hz. Finally the obtained results will be summarized and discussed to evaluate benefit of this morphing strategy.

Mots clefs : morphing, alliage à mémoire de forme, MFC, piézoélectrique, aéroélasticité, PIV.

1 Introduction

On trouve de nombreuses études qui abordent les problématiques de conformation de structure. Différents concepts ont notamment fait l'objet de recherches sur des aéronefs de petites échelles [1] comme sur des échelles plus grandes (avions de chasse, fonction hyper-sustentatrice pour jets). Le programme de recherche mené actuellement par BOEING et la NASA *VCCTEF* (Variable Camber Continuous Trailing Edge Flap) est par exemple entièrement consacré au morphing de bords de fuites. L'intérêt du morphing a été démontré plusieurs fois en termes de gains aérodynamiques comme en termes de capacité à remplir de nouvelles fonctions d'adaptation aux phases de vol.

Au registre des brevets internationaux on dénombre ainsi plus de 900 intitulés dans la classe « aircraft morphing ». Mais la grande majorité se limite à de simples définitions de concepts théoriques. Le passage à la réalisation technologique de tels concepts se heurte principalement aux exigences aéronautiques et à la difficulté que représente le compromis poids puissance des systèmes d'actionnements. On peut donc distinguer plusieurs approches dans la littérature :

- L'intégration d'actionneurs locaux répartis à plusieurs endroits de la structure afin d'articuler plusieurs sous-ensembles souples ou rigides. C'est entre autres le cas de l'approche dite multi block de Barbarino et al. [2] présentée sur la figure (1).

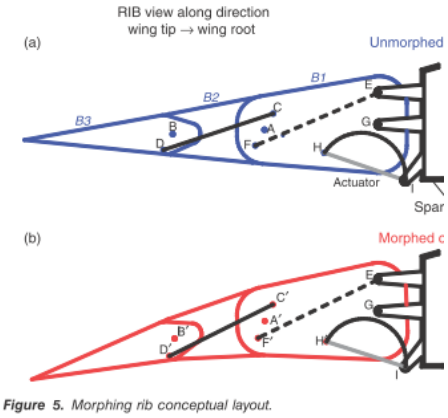


Figure 1 : Système de morphing « multiblock » par actionneurs localisés [2]

Avec ce type d'approche, différents travaux se sont concentrés sur la substitution des mécanismes hydrauliques (localisation de masse et d'efforts) par des systèmes employant des

matériaux actifs. On peut citer par exemple, le projet SAMPSON smart inlet [3] a proposé un vérin à base d'alliages à mémoire de forme pour modifier l'entrée d'air de réacteur.

- La mise en œuvre d'un actionnement uniformément distribué sur l'ensemble des surfaces à déformer. Cette approche vise à supprimer la localisation de masses et d'efforts liées aux charnières et vérins d'une part et d'autre part à garantir la continué des profils aérodynamiques dans l'écoulement. La démonstration des bénéfices de telles approches a pu être faite dans [4] et [5]. Mais aucun de ces travaux n'a encore été éprouvé sur des structures réalistes. Les prototypes actuels tel que celui illustré figure (2) sont soit d'échelle réduite, soit réalisés en matériaux polymère de faible raideur.

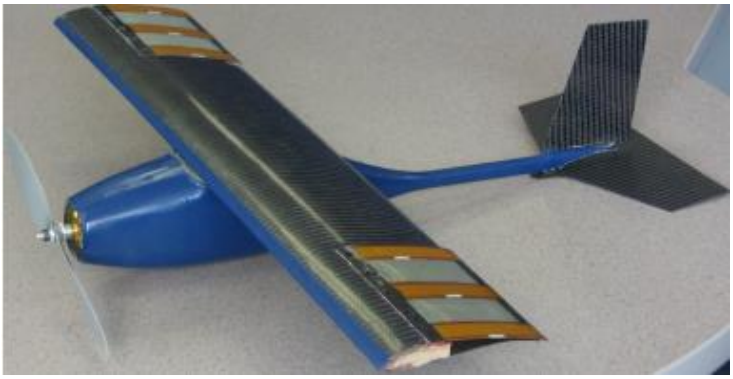


Figure 2 : Prototype échelle réduite de conformation quasi statique par MFC [4]

L'une des rares études à échelle réelle sous effort aérodynamiques réalistes a été menée sur des pales d'hélicoptère soumises à un actionnement électro actif en bord de fuite [6] (une approche qui ne vise donc pas de grandes déformations de la géométrie).

L'originalité de l'approche que nous proposons ici repose sur l'hybridation de deux actionnements couplés afin de de déformer un profil d'aile qui soit capable de réaliser de grandes amplitudes de déformations tout en soutenant des contraintes mécaniques réalistes en termes d'effort d'actionnement et de rigidité de structure.

Les moyens expérimentaux mis en œuvre contraignent dans un premier temps à l'étude des phases les plus lentes d'atterrissage ou de décollage en termes de nombre de Reynolds. Plusieurs études antérieures ont mis en évidence la pertinence de l'emploi de matériaux électro-actifs afin de mettre en place des actionnements du bord de fuite.

Le travail collaboratif de l'équipe GREM3 du LAPLACE et de l'équipe EMT2 de l'IMFT a ainsi démontré qu'une activation piézoélectrique à haute fréquence du bord de fuite interférait avec la création de structures tourbillonnaires, source de bruit aérodynamique (hautes fréquences) qui augmente la trainé [7] et qu'un actionnement uniformément réparti d'alliages à mémoire de forme modifiait suffisamment la cambrure de l'aile pour influencer la zone de mélange et impacter les vibrations dues au flottement aéroélectrique (basses fréquences).

Nous décrirons donc ici l'architecture du prototype en justifiant du choix des matériaux utilisés puis nous présenterons les moyens de validation expérimentale mis en œuvre pour identifier les mécanismes d'interaction fluide structure lors de son activation.

2 Mécanisme d'actionnement hybride

2.1 Activation piézoélectrique

Les propriétés couplées des matériaux piézoélectriques ont été mises en évidence par Jacques et Pierre Curie à la fin de 19em siècle et n'ont cessé depuis d'être exploitées dans des systèmes de capteurs (effet directe de conversion d'une déformation en potentiel électrique) ou d'actionneurs (effet inverse de conversion d'un potentiel électrique en déformation élastique).
Les lois régissant ce couplage piézoélectrique sont définies par les équations constitutives suivantes :

$$\{D\} = [d].\{T\} + [\varepsilon^T].\{E\} \qquad (1)$$

$$\{S\} = [s^E].\{T\} + [d].\{E\} \qquad (2)$$

L'équation (1) traduit l'effet directe où {D} est le vecteur de déplacement électrique qui se décompose en la somme d'une contribution purement électrique caractérisée par la matrice de permittivité $\{\varepsilon^T\}$ et le vecteur champ électrique {E} et d'une contribution de couplage caractérisée par le tenseur des contraintes {T} et la matrice de constantes piézoélectriques [d].
L'équation (2) décrit l'effet inverse où l'on note {S} le tenseur des déformations et $[s^E]$ la matrice de souplesse.

Comme il a été mentionné précédemment, une étude antérieure a pu démontrer les bénéfices d'une activation du bord de fuite de l'aile à faible amplitude autour de la fréquence de *60Hz*. Cette étude préliminaire a été réalisée sur un profil *NACA 0012* rigide. L'actionnement utilisé était basé sur un système *PUSH-PUSH* piézoélectrique multicouche. Pour des raisons d'intégration et de transposabilité de la solution à grande échelle, nous avons choisi de substituer ces céramiques massives par des MFC (Macros Fiber Composite). Les MFC sont constituées d'un arrangement de fibres piézoélectriques inter digitées d'électrodes et encapsulées sous forme de patch. Ce conditionnement a été développé au NASA Langely research center [8] [9]. Elles sont une forme plus évoluée des AFC (Active Fiber Composite) où l'orientation de fibre permet de solliciter le mode piézoélectrique d_{33} mais disposent d'une section carrée qui maximise le contact avec les électrodes. Cette structure est schématisée sur la figure (3).

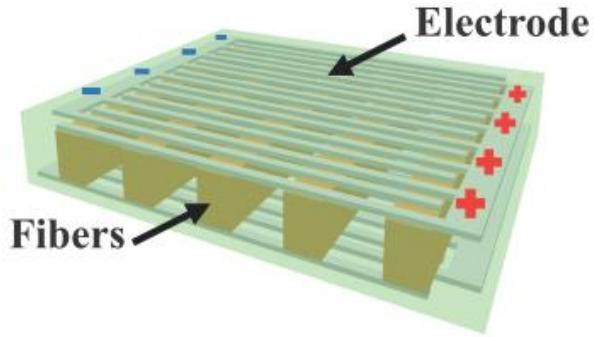


Figure 3 : Schématisation d'une structure MFC

La forme commerciale de ces patchs MFC permet d'atteindre des déformations de l'ordre de *0.2%* et des efforts entre *28N* et *1kN* pour une tension d'alimentation comprise entre *-500V* et *1500V*.

2.2 Alliages à mémoire de forme

La spécificité des alliages à mémoire de forme repose sur un fort couplage thermo-mécanique. L'agencement cristallographique du matériau est modifié par des changements de phases et d'orientation lors de variation de la sa température. Plus particulièrement la transition austénite/martensite engendre une dégradation conséquente des symétries de la maille [10]. Ces processus se traduisent par des propriétés mécaniques remarquables telles que l'effet mémoire, la pseudo-élasticité et un domaine de comportement non linéaire hystérétique.
Un grand nombre d'actionneurs exploite cette large gamme de déformation induite par une variation de température [11]. L'alliage que nous avons retenu pour notre étude est un *NITINOL* à base de Nickel et Titane fréquemment décrit dans la littérature [12] [13]. Les figures (4) et (5) présentent respectivement le comportement hystérétique de notre alliage cyclé en température pour différents niveaux de contraintes et les cycles de contrainte en fonction de la déformation pour différentes températures. Pour le niveau de contrainte recherché (*100MPa-500MPa*) et la plage de températures de notre application (*22°C-90°C*) l'amplitude de déformation attendue est de *5%*

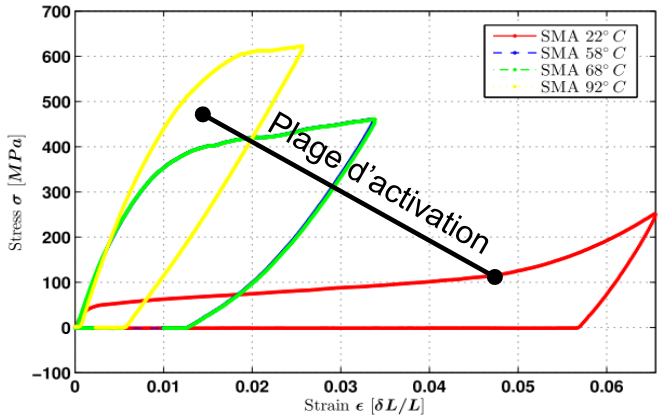


Figure 5 : Comportement mécanique contrainte Vs déformation d'un alliage *NITINOL* pour 4 températures différentes

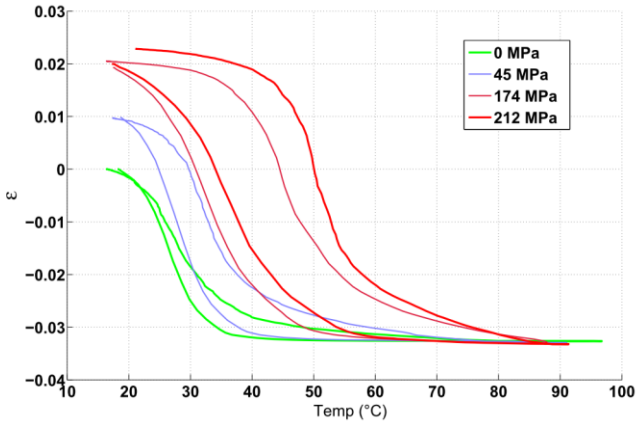


Figure 4 : Déformation d'un alliage de *NITINOL* lors d'un cycle thermique pour 4 niveaux de contrainte

2.3 Intégration dans la structure

La figure (6) schématise le premier concept d'hybridation entre un système de « réseau » d'AMF pour cambrer à basse fréquence un profile *NACA 4412* et une rangée de 8 bimorphes AMF capables d'activer le bord de fuite au-delà de la centaine de hertz.

Pour cela, nous avons choisi d'implanter à la surface de l'intrados et de l'extrados un circuit de tubes de silicone permettant de confiner (pour améliorer la montée en température et le refroidissement) un

câble AMF de *90cm* de long et 1mm de diamètre. Son activation est assurée par effet Joule (sous un courant de *8A*) et un système de refroidissement par flux d'air forcé.
Un mécanisme dédié à la liaison entre les deux parties activées a dû être conçu afin d'assurer la continuée des surfaces en contact avec l'écoulement lors des grandes déformations de la structure.

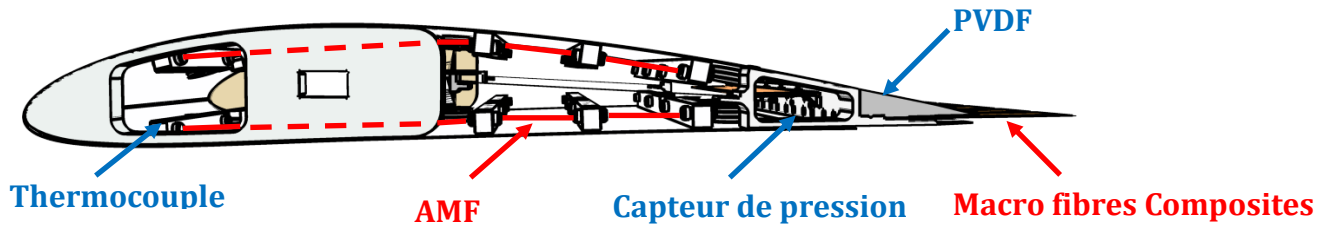


Figure 6 : Schéma du mécanisme d'actionnement du prototype

Comme précisé précédemment nous avons choisi d'intégrer des MFC pour faire vibrer l'extrémité du bord de fuite. L'actionnement est assuré par un alignement de structures bimorphes chacune composée de deux patchs MFC collés sur un substrat en acier de *0.3mm* d'épaisseur comme l'illustre la figure (7). Le comportement dynamique de cet agencement a été mesuré par vibromètre laser. La réponse fréquentielle est représentée sur la figure (8).

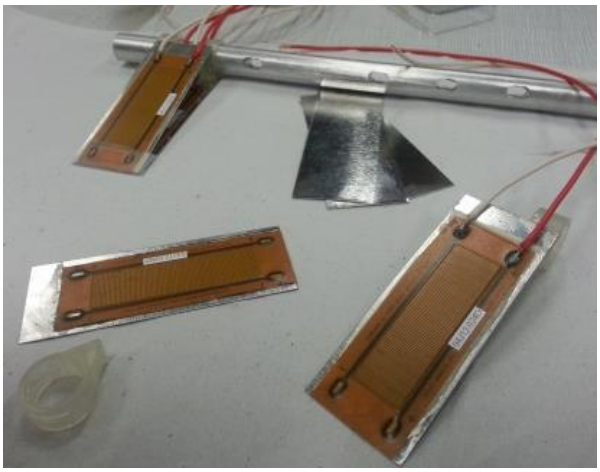


Figure 7 : Photographie des bimorphes MFC

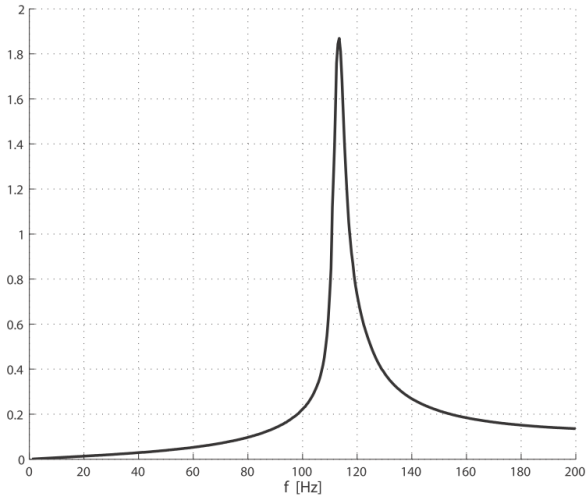


Figure 8 : Réponse fréquentielle des bimorphes MFC

Cette configuration permet ainsi d'activer indépendamment chacun des patchs sur une plage fréquentielle de *0Hz* à *200Hz* avec une amplitude de déflexion maximale de ± *2mm*. D'autre part, il est envisageable d'utiliser ponctuellement l'effet piézoélectrique directe des MFC pour mettre en place une boucle d'asservissement.

3 Dispositif de mesure

3.1 Instrumentation de la soufflerie

La campagne de mesures aeroelastique a été réalisée au sein de l'IMFT dans sa soufflerie S4. Les dimensions de la section de mesure sont de *670mm* par *715mm*. Le prototype a été positionné suivant l'axe transversal de la soufflerie avec une incidence de *-10°* comme l'illustre la figure (9).

L'écoulement d'air s'effectue suivant le même axe à une vitesse de *8m/s* à la température ambiante de *22°C* avec un taux de turbulence mesuré en amont de *0.1%.* La corde du prototype mesure *425cm* soit un nombre de Reynolds de *218000*.

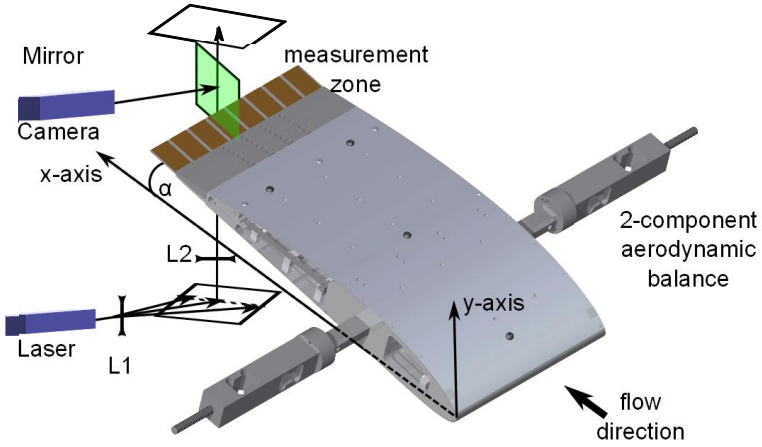


Figure 9 : Schéma de l'instrumentation du prototype dans la soufflerie pour la mesure PIV

Afin de mesurer les effets macroscopiques de la modification de cambrure du prototype, une balance aérodynamique a été implémentée au système. Elle permet d'accéder aux variations de trainé et de portance durant l'expérience. Les variations locales de pression autour du bord de fuite sont quant à elles mesurées par un capteur de pression relative (de type Kulite XCQ-093 *350mBar*). Les conditions limites autour de la maquette sont définies par deux parois planes et un carénage profilé autour des bras de la balance.

3.2 Mesure par PIV

Afin d'observer les structures tourbillonnaires qui se forment en aval du prototype, un système de vélocimétrie par image de particule (PIV) a été mis en œuvre. L'écoulement d'air est ensemencé de fines particules de fumée (diamètre moyen de *3.4μm*) et une caméra rapide (Phantom v1210) focalise sur un plan *x-y* éclairé par une nappe laser. La nappe est générée par deux cavités laser à la longueur d'onde de *527nm* ND :YLF (Quantronix, Darwin Duo). Dans notre cas, le laser et la caméra sont synchronisés à la fréquence de *6000hz*. Un miroir est disposé sur la partie supérieure de la soufflerie pour éclairer le dessus du bord de fuite et augmenter l'intensité d'éclairage. La nappe ainsi obtenue mesure *1.5mm* d'épaisseur et la zone d'observation *150cm* sur *200cm*. La zone balayée par l'extrémité de la maquette est masquée par un filtre de protection qui protège le capteur de la caméra de toute réflexion directe du laser (zone blanche sur la figure (10 a-l)).
Pour remonter au champ de déplacement du fluide, l'image est divisée en zone de *16×16 pixels* soit *2.3mm×2.3mm.* L'inter corrélation entre deux de ces zones issues de deux images consécutives permet de déterminer le déplacement de particule le plus probable. Connaissant le temps d'échantillonnage entre chaque prise de vue on peut calculer les composantes de la vitesse locale dans le plan d'étude. Aux vues de la masse, de la taille des particules et de la viscosité dynamique du fluide, le nombre de Stokes est suffisamment petit pour supposer que les particules suivent la trajectoire du fluide sans le perturber comme le suggère [14] [15].

4 Résultats

4.1 Champs de vitesse lors de l'actuation haute fréquence

Afin d'explorer les phénomènes mis en évidence lors des études préliminaires [7,16-18] menées sur des géométries moins réalistes ou de plus petite échelle, nous avons décidé de mener cette campagne avec les trois fréquences d'activation du bord de fuite : *30hz, 60hz* et *90hz*.
Les résultats sont synthétisés sur la figure (10). On y présente la moyenne temporelle des composantes du tenseur de contrainte de Reynolds $\overline{u^2}/U_\infty^2$, $\overline{v^2}/U_\infty^2$, $\overline{uv}/U_\infty^2$ dans la configuration sans actuation puis pour chaque fréquence.

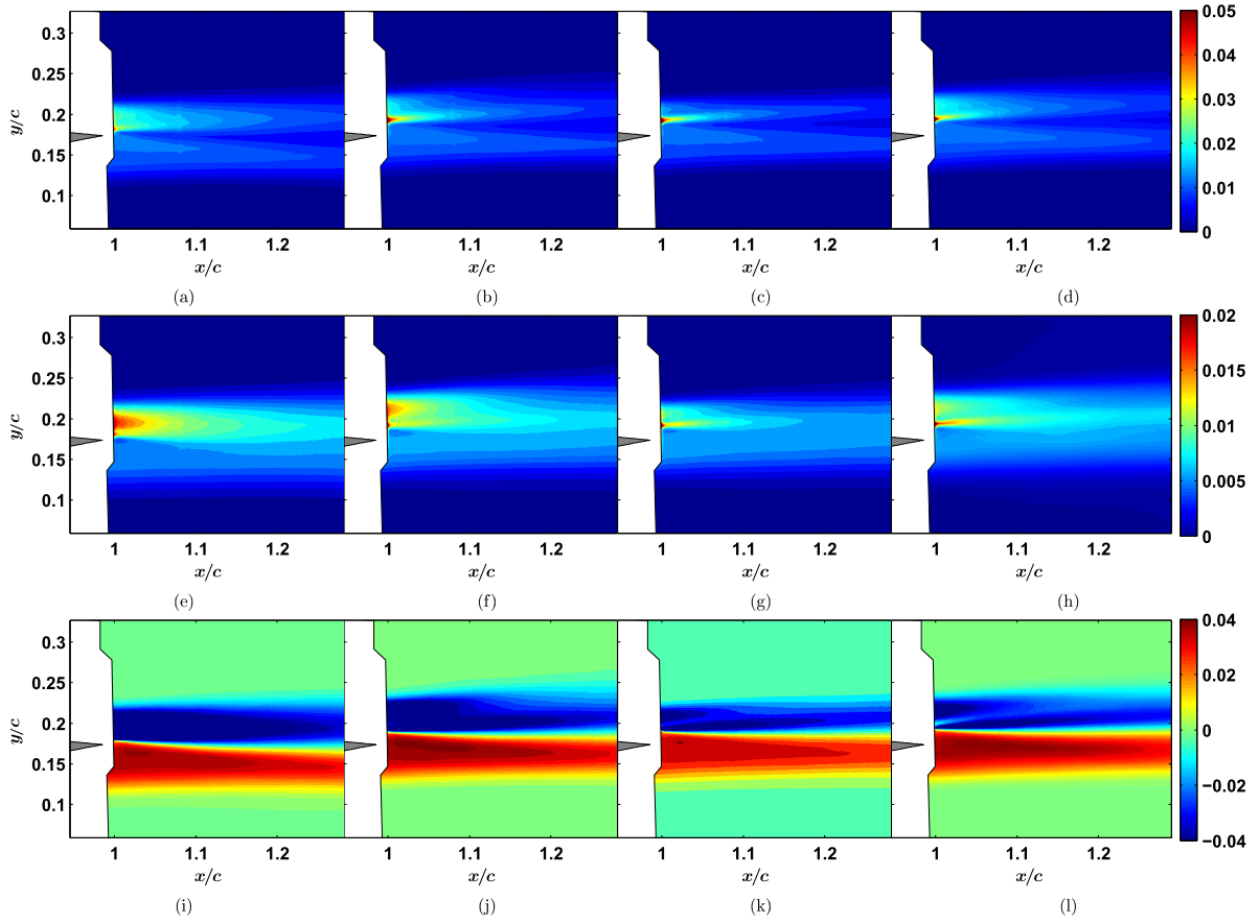


Figure 10 : Composante $\overline{u^2}/U_\infty^2$ du tenseur de contrainte de Reynolds au repos (a) et pour des actionnements à *30hz, 60hz* et *90hz* (b,c,d). Composante $\overline{v^2}/U_\infty^2$ au repos (e) et pour les mêmes actionnements (f,g,h). Composante $\overline{uv}/U_\infty^2$ au repos (i) et pour les mêmes actionnements (j,k,l).

En l'absence d'activation (figure (a,e)), on observe nettement que l'amplitude maximum pour les composantes u et v se situe dans la zone de mélange en pointe du bord de fuite. Cela traduit la concentration de vorticité dans cette zone. L'intensité et l'étendue de cette zone est directement influencée par l'activation du système. On remarque que la zone de mélange s'affine globalement lors de la mise en vibration du bord de fuite et que la composante $\overline{v^2}/U_\infty^2$ est plus particulièrement impactée à *60hz* (figure (g)). La composante $\overline{u^2}/U_\infty^2$ semble encore davantage se concentrer à la pointe du bord de fuite sous l'effet de l'actionnement. On peut interpréter cette observation comme un aplatissement global des structures tourbillonnaires dans le sillage. Logiquement, la composante

transverse $\overline{v^2}/U_\infty^2$ suit la même évolution puisque u et v diminuent. L'actionnement de *60hz* semble proche du couplage optimum puisque la couche limite s'élargie de nouveau à *90hz*.

4.2 Portance et pression lors des grandes déformations

L'activation des alliages à mémoire de forme permet de cambrer la structure de l'aile. Elle se décompose en une phase de chauffe de trois secondes d'un côté de l'aile (extrados ou intrados), d'une stabilisation, suivie d'un refroidissement de cinq secondes. L'exploitation des images de PIV permet de suivre la position précise de la pointe du bord de fuite durant cet essai. On observe ainsi sur la figure (11) que l'activation de l'extrados engendre une cambrure vers le haut qui fait monter le bord de fuite de *3cm* alors que l'activation opposée génère une déflexion d'environ *4cm*.

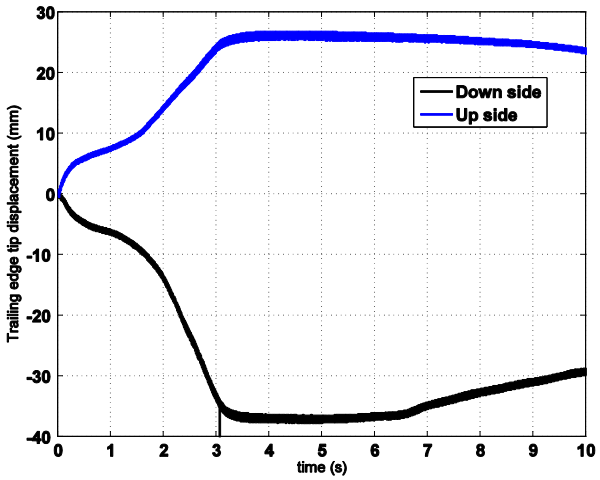


Figure 11 : Déplacement vertical de l'extrémité de bord de fuite durant l'actionnement des AMF

L'effet de ce changement de cambrure du profil a un impact direct sur la portance de l'aile. La mesure réalisée avec la balance met clairement en évidence cette corrélation sur la figure (12). L'amplitude de déformation appliquée génère une variation significative de portance de l'ordre de *3N*. Il est donc envisageable d'exploiter cet actionnement pour un contrôle adaptatif de portance destiné à chaque phase de vol.

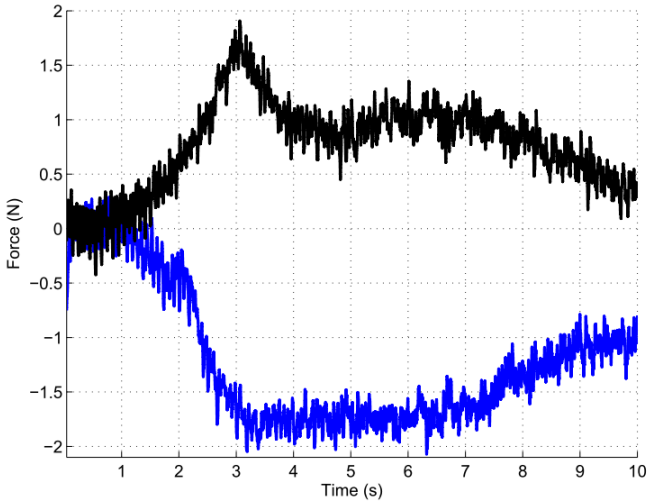


Figure 12 : Variation de la portance durant l'actionnement des AMF

D'autre part, la mesure de pression in situ en bord de fuite présente une bonne concordance avec les variations de portance observées précédemment. La courbe bleue de la figure (12) présente une nette augmentation durant les deux premières secondes puis une inversion de son sens de variation lorsque les AMF sont refroidis entre la deuxième et troisième seconde de la séquence. Puis le niveau de pression revient vers sa valeur initiale. Ce premier résultat indique ainsi qu'il est envisageable d'utiliser cette mesure de pression en temps réel comme retour d'asservissement pour le contrôle de cambrure du système.

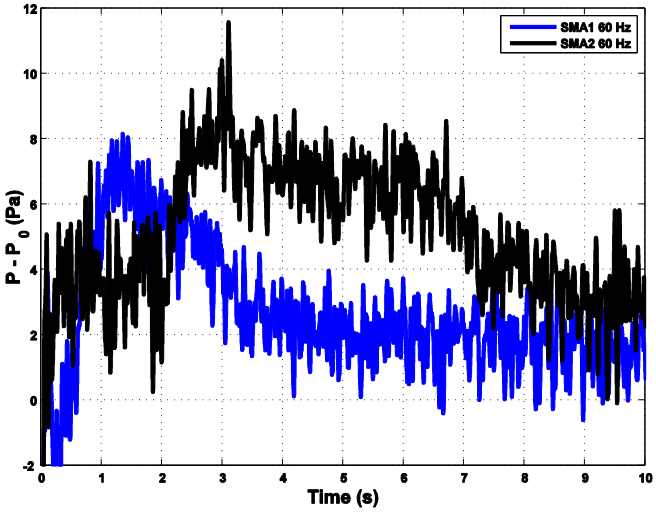


Figure 73 : Variation de la pression durant l'actionnement des AMF

5 Conclusion

L'objectif de cette étude était de montrer les effets couplés d'un actionnement hybride capable à la foi de déformer à grande amplitude un profil d'aile et d'activer à haute fréquence son bord de fuite. Une architecture originale a ainsi été proposée. Elle associe les propriétés pseudo-élastiques d'alliages à mémoire de forme à la grande plage dynamique de bimorphes MFC.
L'observation en soufflerie de ce prototype a permis de confirmer que l'activation haute fréquence du bord de fuite a un impact considérable sur la formation de structures tourbillonnaires dans la zone de mélange. Il a également été mis en avant que la fréquence d'actionnement influence le champ de vitesses local. Dans notre configuration, un optimum semble se situer autour de la fréquence d'actionnement de *60hz*. Il est ainsi envisageable d'exploiter cette stratégie pour limiter la formation de turbulences à hautes fréquences de type Kelvin-Helmholtz générant du bruit aérodynamique et de la trainé. D'autre part, nous avons démontré la faisabilité d'un actionnement capable de soutenir les charges aérodynamiques à un Reynolds de *218000* et générant des amplitudes de déformation suffisantes pour modifier significativement la portance du système.

Références

[1] O. Bilgen and M. I. Friswell. Piezoceramic composite actuators for a solid-state variable camber wing. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 25(7):806–817, 2014.

[2] S. Barbarino, O. Bilgen, R.M. Ajaj, M.I. Friswell, D. J. Inman, A Review of Morphing Aircraft, Journal of Intelligent Material Systems and Structures (2011) 22-823

[3] F. T. Calkins, J. H. Mabe, Shape Memory Alloy Based Morphing AerostructuresJournal of mechanical design vol.132, 2010

[4] O. J. Ohanian III, C. Hickling, B. Stiltner, E. D. Karni et al Piezoelectric Morphing versus Servo-Actuated MAV Control Surfaces 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC, Structural Dynamics and Materials Conference.

[5] B.W. LaCroix and P. G. Ifju Macro Fiber Composites and Substrate Materials for MAV Wing Morphing conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series

[6] M. Debiasi, Y. Bouremel, and Z. Lu, V. Ravichandran Deformation of the Upper and Lower Surfaces of an Airfoil by Macro Fiber Composite Actuators 31st AIAA Applied Aerodynamics Conference, 2013.

[7]J. Scheller, M. Chinaud, J.F. Rouchon, E. Duhayon, S. Cazin, M. Marchal, M. Braza. Trailingedge dynamics of a morphing NACA0012. *Journal Fluids & Structures*, 2015.

[8] W Wilkie, J High, and J Bockman. Reliability testing of nasa piezocomposite actuators.2002.

[9] R Brett Williams, Gyuhae Park, Daniel J Inman, and W Keats Wilkie. An overview of composite actuators with piezoceramic fibers. Proceeding of IMAC XX, pages 4–7, 2002.

[10] C. Lexcellent, Shape-memory Alloys Handbook, Wiley-ISTE, March 2013, ISBN: 978-1-84821-434-7

[11] Chao-Chieh Lan and Chen-Hsien Fan. An accurate self-sensing method for the control of shape memory alloy actuated flexures. Sensors and Actuators A: Physical, 163(1):323–332, 2010.

[12] J Ro and A Baz. Nitinol-reinforced plates: part i. Thermal characteristics. Composites Engineering, 5(1):61–75, 1995.

[13] A Baz, T Chen, and J Ro. Shape control of NITINOL-reinforced composite beams. Composites Part B: Engineering, 31(8):631–642, 2000.

[14] Sheldon I Green. Fluid Vortices: Fluid Mechanics and Its Applications, volume 30.Springer, 1995.

[15] M Samimy and SK Lele. Motion of particles with inertia in a compressible free shear layer. Physics of Fluids A: Fluid Dynamics (1989-1993), 3(8):1915–1923, 1991

[16] M. Chinaud, J. Scheller, J. F. Rouchon, E. Duhayon, and M. Braza. Hybrid Electroactive Wings Morphing for Aeronautic Applications. *Solid State Phenomena*, 198:200--205, 2013.

[17] M. Chinaud, J.F. Rouchon, E. Duhayon, J. Scheller, S. Cazin, M. Marchal, and M. Braza. Trailing-edge dynamics and morphing of a deformable flat plate at high reynolds number by time-resolved {PIV}. *JFS*, 2007.

[18] M. Chinaud, A. Boussaid, J.F. Rouchon, E. Duhayon, E. Deri, D. Harribey, M. Braza, Thermo-mechanical coupling in Nitinol. Application to an electro-morphing plate., 20th International Conference on Electrical Machines (2012)