RAPPORT FINAL D'UN PROJET SOUTENU PAR LA FONDATION STAE

Nom du projet : EMMAV
Coordinateur scientifique : Marianna BRAZA

Rappel des principaux objectifs :

Ce projet pluridisciplinaire s'inscrit dans le contexte d'une synergie entre les recherches menées dans le domaine des matériaux intelligents, des nouvelles approches de modélisation de l'interaction fluide-structure et des nouvelles approches expérimentales de démonstrateur électroactif d'aéronefs. L'objectif principal du projet est l'optimisation des performances des drones en régime de fonctionnement réel grâce à l'application concrète des concepts du morphing. L'avènement de micro-véhicules impose dès le stade de l'avant-projet la conception du système électroactif de l'aéronef. Visant à rassembler autour d'un même objet différentes spécialités scientifiques complémentaires, le projet propose l'utilisation de surfaces de morphing electroactif innovant pour atteindre le contrôle en vol (flight control) d'aeronefs. Un nouveau concept de design d'aéronef sera réalisé par des démonstrateurs UAV (Unmanned Air Vehicle) qui seront construits sur la base de modélisation de l'interaction fluide-structure et d'expériences utilisant des approches métrologiques avancées, les deux approches tenant compte des propriétés des matériaux électroactifs intelligents. Le morphing électroactif est notamment appliqué sur les nano-rotors pour accroître leur efficacité aérodynamique (figure of merit) par l'intermédiaire de vrillage cyclique adaptatif et sur un volet, correspondant à la configuration générique d'un déflecteur ou d'un aileron.

I- BILAN SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

Certaines parties du rapport ont été rédigées en anglais, car elles sont utilisées pour une publication (article de revue) entre tous les partenaires du projet pour les différents concepts d'actuations en fonction de la dimension de l'aéronef et des l'échelles de temps visées.

I-1 : Principales avancées scientifiques du projet (5 à 10 pages) :

The present project achieved significant advancements in novel actuation and morphing concepts and fluid-structure interaction modelling, applied in different time and length scales coming from microdrones towards deflective or tail ailerons.
These principal advancements are summarised in the following items.

- En partant d'une configuration « minimaliste » de nanodrone de type birotor contrarotatif, il s'agissait tout d'abord de comprendre, dans la gamme des échelles considérées (diamètre rotor de 7,5 cm), comment s'effectue l'interaction entre les deux rotors coaxiaux, avec ou sans effet d'inclinaison des axes de rotation. Ce travail a été effectué sur la base de muscles artificiels de la catégorie SMA (*SmartServos*) destinés à contrôler sur 2 axes l'orientation de la tête du rotor supérieur. Cet effet aéro-propulsif a pu être simulé numériquement pour évaluer l'amplitude requise pour la gouverne.

- La seconde étape de l'étude a pris acte des limites de ce premier procédé de contrôle par actuateur SMA et s'est proposé par l'ISAE d'envisager l'utilisation de polymères de type IPMC ou PVDF-beta en lien avec le laboratoire LAPLACE. Le travail mené au sein d'EMMAV a montré l'intérêt de l'approche IPMC qui ne nécessite qu'une alimentation à basse tension et conduit à des amplitudes significative par opposition à des actuateurs piézoélectriques qui nécessitent des tensions élevées et permettent d'accéder à des amplitudes très limitées.
  En ce qui concerne la dimension des drones, le projet EMMAV <u>a permis le dépôt d'un brevet</u> (voir liste de publications).

- La troisième étape a porté sur la mise en œuvre d'un concept de micro-drone de type poussée vectorielle. Dans cette configuration, une nouvelle gamme d'actuateurs électroactués développés en collaboration avec l'Université de Cergy a été envisagée sur un montage de type « rosace » pour articuler la tête rotor. Les propriétés mécaniques et dynamiques de ce nouveau type d'actuateur sont remarquables et surclassent les autres types d'actuateurs étudiés à ce stade dans le cadre de l'intégration dans un système de micro-drones.

- La quatrième étape concerne l'étude de concepts du morphing pour des aéronefs de dimensions plus grandes, visant des applications d'ailerons déflecteurs d'un drone, des ailerons en aval du bord de fuite d'avion souple de prochaine génération et en aval du bord de fuite de rotors souples. Pour cette classe d'actuation, des concepts spécifiques d'alliages à mémoire de forme (AMF/SMA) de Nitinol ont été étudiés et instrumenté un volet en incidence. Des approches de modélisation fluid-structure et des mesures en soufflerie en synergie entre LAPLACE et IMFT ont permis de caractériser la modification des structures tourbillonnaires en aval du bord de fuite, à des nombres de Reynolds identiques aux applications d'aérodynamique industrielle. Ces concepts du morphing se sont avérés efficaces pour produire de grandes déformations en mode d'opération de basse fréquence (ordre de 10-20 Hz) et ont été capables de modifier considérablement la structure de l'écoulement en aval, en ce qui

concerne les modes d'instabilité tourbillonnaire de von Karman et de tourbillons de Kelvin-Helmholtz, ces derniers, responsables majoritairement du bruit aérodynamique.

▪La cinquième étape consiste en l'étude de concepts du morphing basés sur l'actuation par piezo-céramiques, afin d'actuer les bords de fuite des voilures à plus haute fréquence (ordre de 100 à 200 Hz). La réalisation d'un prototype a été effectuée grâce au projet EMMAV, qui a permis de caractériser les propriétés des piezos PZT en termes de capteur-actuateur. Ces aspects ont été importants en vu de proposer des concepts du morphing *de faible coût énergétique*, capables d'utiliser l'énergie environnante pour la restituer ensuite dans l'actuation. L'étude des propriétés structurales détaillée de ces concepts a été menée en comparaison avec d'autres concepts de piezoactuateurs (ex. piezos bi-morphes). Le prorotype réalisé a réussi de mettre en œuvre pour la première fois en l'état de l'art un concept d'**hybridation** entre les AMF utilisés pour le corps principal de l'aile et de PZT utilisés pour le bord de fuite de celle-ci, en réussissant ainsi une déformation simultanée de grande flèche ou vrillage et de plus haute fréquence. Ce prototype, réalisé au sein d'EMMAV, est prêt pour installation en soufflerie (cette phase d'étude est prévue au sein du projet DYNAMORPH, permettant une opération en régime dynamique de plus haute fréquence.

▪La sixième étape a consisté en l'étude des propriétés éelectroactives d'une nouvelle classe de polymères électoractifs de type PVDF pour actuation et capture des fluctuations de pression au bord de fuite des voilures. Cette nouvelle calsse des PVDF a comme but d'instrumenter de grandes échelles de voilures visant les applications citées précédemment. Un prototype a été réalisé au sein d'EMMAV permettant de caractériser les propriétés de capteur-actuateur de ces matériaux et leur comportement en opération vibratoire. de premiers tests en soufflerie ont été élaborés. Ce concept permet en tant qu'actuateur, d'agir comme des cils actifs au bord de fuite pour modifier la fréquence des tourbillons de type K-H et d'autres tourbillons plus chaotiques en vue d'atténuer le bruit aérodynamique. Il permet par ailleurs une opération en tant que 'plumes' d'oiseaux de grande envergure, dont l'actuation peut diminuer la traînée et augmenter la portance par la création de microcirculations. En tant que capteurs, ces matériaux polymères permettent d'enregistrer la pression fluctuante simultanément le long de toute l'envergure de l'aileron et de modéliser ainsi d'une manière efficace la fonction de transfert 'actuateur-réponse du système', pour le 'design ensuite des commandes de vol optimales. Ces derniers aspects, réalisés grâce à EMMAV, sont à l'étude au sein du projet DYNAMORPH.

▪La septième et dernière étape consiste en la création d'un ensemble de résultats issus de la modélisation numérique de l'interaction fluide-structure de Haute Fidélité **(CFDSM-HF),** à l'aide d'approches avancées et d'un ensemble de résultats expérimentaux issus de métrologies avancées (incluant la Tomo-PIV entre autres), et l'élaboration d'approches de modélisation d'ordre réduit, capables d'inclure le comportement de modes du système dynamique fluide-

structure électroactuée, les plus énergétiques. Ces approches (**ROM**-Reduced Order Modelling, développés en grande partie au sein d'EMMAV), bénéficiant de **l'hybridation** entre expériences et simulations HF sont en cours d'utilisation pour l'élaboration de concepts de modèles rapides et de hautes qualités prédictives pour se substituer aux modèles HF pour le design de la surface intelligente des aéronefs.

Les aspects précédents sont détaillés dans les pages ci-après, 'partnerwise'.

- **Partenaire ISAE**

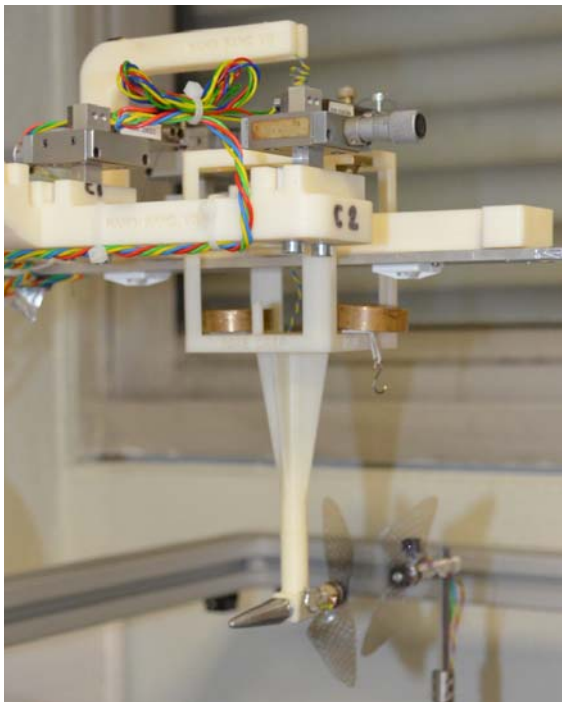
La structuration de l'étude confiée à l'ISAE a consisté à examiner plusieurs étapes successives qui sont détaillées dans le présent rapport selon le plan suivant : 1. La première partie a été consacrée à l'étude aéro-propulsive d'un nanodrone birotor contrarotatif et a permis de montrer que la difficulté de miniaturiser un tel système (inférieur à 20 g) est la réduction d'échelle des mécanismes d'actuation : plateau cyclique, gouvernes actuées par servos conventionnels, etc. 2. La seconde partie consistait à caractériser la réponse en amplitude et en fréquence d'un actuateur de la catégorie des IPMC par comparaison avec les SMA et les polymères piézoélectriques. 3. La troisième partie a conduit à la mise au point d'un concept de type poussée vectorielle et l'usage d'actuateurs de nouvelle génération de type RIP.

1. Nanodrone birotor à actuateur de type SMA

En partant d'une configuration « minimaliste » de nanodrone de type birotor contrarotatif, il s'agissait tout d'abord de comprendre, dans la gamme des échelles considérées (diamètre rotor de 7,5 cm), comment s'effectue l'interaction entre les deux rotors coaxiaux, avec ou sans effet d'inclinaison des axes de rotation. Ce travail a été effectué sur la base de muscles artificiels de la catégorie SMA (*SmartServos*) destinés à contrôler sur 2 axes l'orientation de la tête du rotor supérieur. Cet effet aéro-propulsif a pu être simulé numériquement pour évaluer l'amplitude requise pour la gouverne. Les résultats de cette première étape ont été publiés dans le cadre de la thèse de M. Liu Zhen en cotutelle internationale (ISAE-NPWU). Au cours de cette thèse, le Professeur Roberto ALBERTANI de l'Université de Floride a été accueilli à l'ISAE pour participer à la mise en œuvre de la métrologie du nanodrone.

Une série de 6 bancs successifs a été développée en tenant compte de la difficulté extrême de mesurer avec précision des poussées mais surtout des couples de très faible amplitude. Au terme de ces différents bancs, une configuration de type « cage suspendue » a été retenue pour minimiser les effets de frottements induits par les mouvements de la cage de mesure sur son support (lames de cutter) tout en limitant les oscillations à deux degrés de liberté en rotation. Cette méthodologie de mesure très originale à ces échelles (le rotor mesure à peine 7 cm de diamètre) permet ainsi d'accéder à l'interaction entre les rotors de manière indépendante puisque un second rotor peut être approché et mesuré indépendamment grâce à une balance 5 composantes de haute sensibilité (**Fig. 1**).

Dans le cadre de la thèse de M. Liu Zhen, des calculs numériques Navier-Stokes 3D ont été effectués pour étudier l'interaction aéro-propulsive des deux rotors. La **Fig. 2** permet de montrer que les tourbillons générés par le pied de pale et par le bout de pale du rotor amont (supérieur) interagit sur le champ aérodynamique du rotor aval (inférieur). Cette interaction nuit à l'obtention de rendements propulsifs globaux significatifs et peut introduire des non linéarités dans le contrôle du nanodrone.



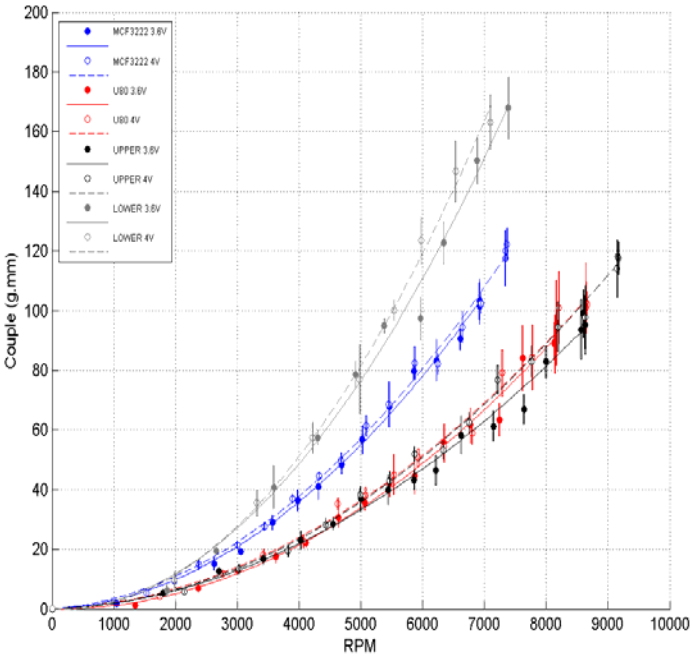


Figure 1
Banc pour nanorotor avec prise en compte de l'effet de désorientation d'un des 2 rotors (à gauche). Effet de différents couples d'hélices sur l'évolution du couple des rotors amont et aval (à droite)

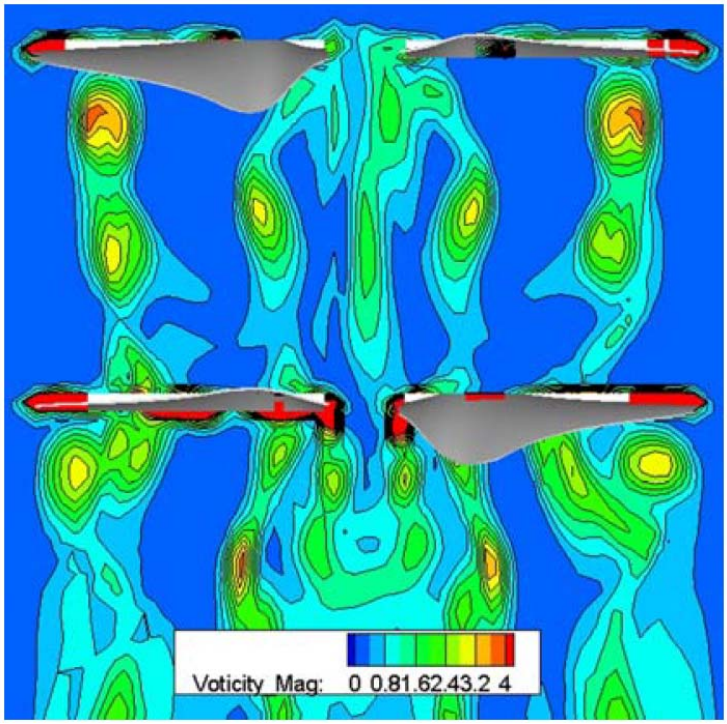


Figure 2
Interaction aérodynamique des deux rotors
par simulation numérique Navier-Stokes.

Enfin, un prototype de nanodrone électroactué a été réalisé sur la base d'actuateurs de type SMA. Ce prototype a d'abord été conçu à l'aide d'un modèle dynamique basé sur l'équation de Lagrange (théorème des puissances virtuelles). La **Fig. 3** illustre le concept dans lequel on reconnaît la présence d'actuateurs SMA placés à 90° (**Fig. 3**, à gauche) et la réalisation pratique du concept avec un anneau de manipulation (**Fig. 3**, à droite). Ce type de nanodrone utilisant des actuateurs de type muscles artificiels est un exemple unique au monde à la connaissance des auteurs.

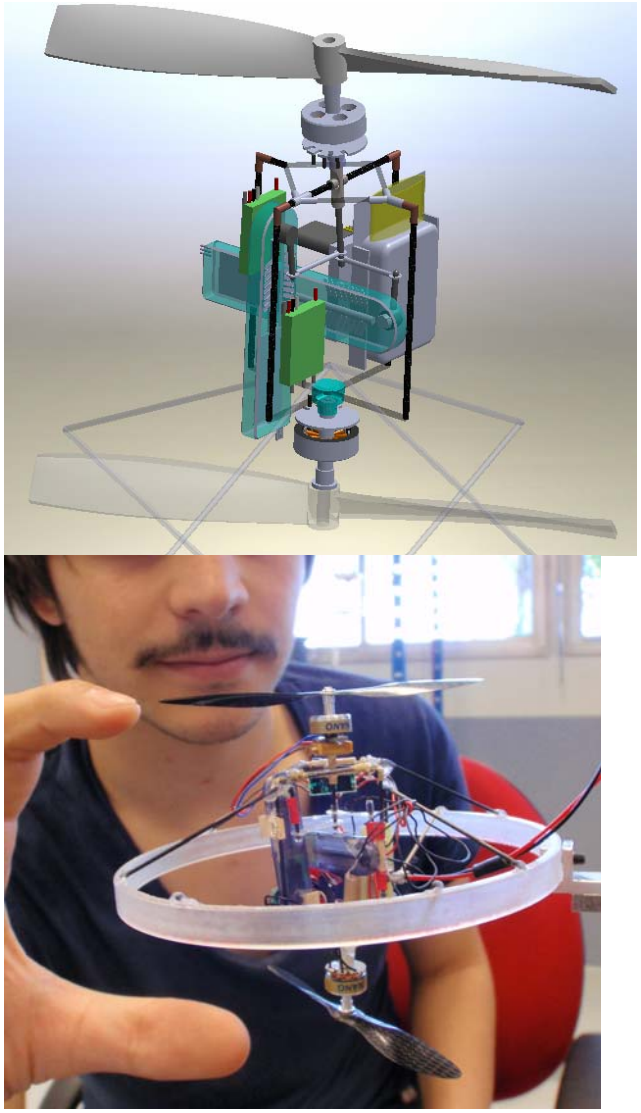


Figure 3
Conception théorique (à gauche) puis réalisation pratique (à droite) d'un concept de nanodrone électroactué à l'aide de gouvernes SMA.

2. Muscles artificiels de type IPMC et application aux gouvernes de nanodrones

La seconde étape de l'étude a pris acte des limites de ce premier procédé de contrôle par actuateur SMA et s'est proposé d'envisager l'utilisation de polymères de type IPMC ou PVDF-beta en lien avec le laboratoire LAPLACE. Un post-doctorant, *M. Anbang SUN*, a été recruté par le RTRA pour mener à bien une caractérisation expérimentale approfondie d'un actuateur de type IPMC. Ce travail a montré l'intérêt de l'approche IPMC qui ne nécessite qu'une alimentation à basse tension et conduit à des amplitudes significative par opposition à des actuateurs piézoélectriques qui nécessitent des tensions élevées et permettent d'accéder à des amplitudes très limitées. Le professeur *Chinnapat THIPYOPAS* de l'Université de Bangkok a été accueilli par le RTRA dans le cadre de cette étude en permettant la mise en œuvre

expérimentale d'un dispositif simulant l'utilisation d'actuateurs IPMC à un concept de nanodrone.

A peu de chose près, l'objet à concevoir est en soi une voilure appareillée dans laquelle les fonctions d'alimentation énergétique, de contrôle de direction et l'actuation associée et d'émission-réception nécessaire à l'exécution d'une mission doivent être distribuées. Une preuve de concept était à faire.

Le projet a très tôt bénéficié du concours du Professeur *Peter Russer* de l'Université TÜ Munich qui a séjourné à l'ISAE d'Août à Septembre 2009. Sa grande culture scientifique et son expérience de l'approche système des problèmes multi physiques ont permis d'élaborer, dès le démarrage du projet, une vision globale du problème sans qu'aucun aspect n'en soit négligé.

A partir du choix raisonné d'aborder la réduction d'échelle dans un contexte de voilure tournantes contrarotatives alimentées électriquement, trois demandes de dépôt de brevet ont ainsi pu être présentées dans le courant de l'automne 2009 portant respectivement sur le contrôle de direction des voilures (*Dispositif de Contrôle de Direction d'un Aéronef Miniaturisé à Voilure Tournante , Jean- Marc Moschetta, Peter Russer, Damienne Bajon*), un type d'actionneur (Brevet : *D. Bajon* et al., 2009) permettant le contrôle du plan des rotors ainsi qu'un principe d'antenne intégrées à la voilure permettant des émission/réception omnidirectionnelles et isotrope (Antenne Omnidirectionnelle pour Hélicoptère, *P. Russer, D. Bajon*).

A ce travail de conception global a été associé une large prospection sur l'état de l'art et les perspectives d'avancées technologiques des matériaux susceptibles de réaliser les fonctions de stockage de l'énergie, batteries et cellules de conversion / production énergétique et muscles artificiels. Enfin, une série d'ateliers avec l'IMFT a permis d'établir une feuille de route à long terme sur les formulations lagrangiennes des problèmes multi-physiques et leurs résolutions comparées par les méthodes de réseaux équivalents et de réduction d'ordre.

Dans le cadre de cette architecture le projet a directement bénéficié de la contribution de deux stages dédiés à l'examen de l'efficacité des différentes stratégies possibles de réalisation de la distribution de puissance moteur et de la gestion des signaux de commande. Du 15 Octobre 2009 au 30 Janvier 2010, *Guillaume Boguszewski*, en fin de contrat doctoral, a réalisé un stage de trois mois au laboratoire durant lesquels il a systématiquement appliqué les méthodologies développées dans le cadre du floorplanning des SiP (Systèmes in Package). Ce travail a été repris et mené son terme lors du stage de fin d'Etude de Mastère de *Cyril Jourda*. Des gains considérables d'efficacité ont été obtenus en pratiquant une optimisation systématique des composants dédiés contrôle de vitesse et ç à l'alimentation moteur.

La profonde symétrie structurale du design de la plateforme de référence élaboré dès la fin de l'automne 2009 nous a conduit à approfondir la recherche de muscles artificiels construits à partir de matériaux capables de produire des déplacements d'amplitude suffisante qui soit compatibles avec des ressources énergétiques réduites et de fortes contraintes de poids au prix, dans l'état d'avancement technologique du temps, d'efforts disponibles, encore limités.

Le choix des polymères ioniques métalliques (IPMC) s'est rapidement confirmé et imposé. Une étude systématique des performances, des méthodes de caractérisation et d'extraction de modèle, phénoménologiques dans un premier temps, ont fait, à partir de matériaux accessibles à l'achat, l'objet des travaux post-doctoraux de Ang Bang Sun (**Fig. 4**).

L'issue de ces travaux nous a permis, de présenter une communication à l'édition 2011 de l'International Workshop on Biomimetics (*A-B Sun* et al., 2011, [4]). La qualité de ces travaux, positionnée à l'état de l'art a permis d'en proposer un exposé synthétique pour publication dans une revue (*A-B Sun* et al., 2011, [5]) . En particulier, la cohérence entre les modèles phénoménologiques établis en régime dynamique et les modèles statiques a pu être établie.

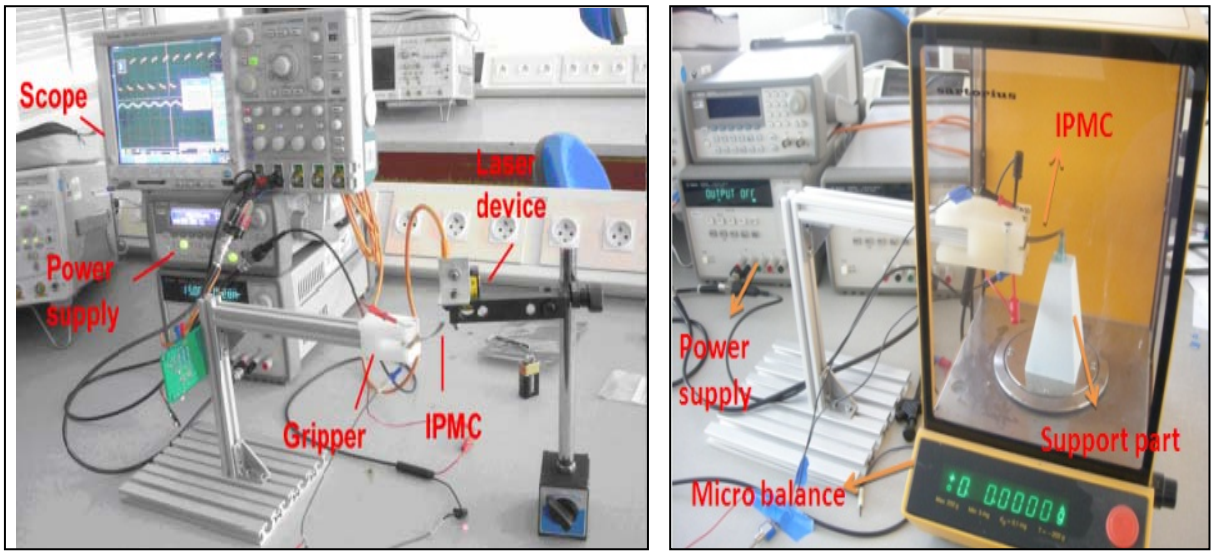


Figure 4
Etudes préliminaires quant à l'utilisation d'actuateurs IPMC pour un nano drone à rotors coaxiaux

3. Micro-drone à poussée vectorielle et actuation de nouvelle génération (RIP)

Cette troisième étape a porté sur la mise en œuvre d'un concept de micro-drone de type poussée vectorielle. Dans cette configuration, une nouvelle gamme d'actuateurs électroactués développés en collaboration avec l'Université de Cergy a été envisagée sur un montage de type « rosace » pour articuler la tête rotor. Les propriétés mécaniques et dynamiques de ce nouveau type d'actuateur sont remarquables et surclassent les autres types d'actuateurs étudiés à ce stade par l'ISAE dans le cadre de l'intégration dans un système de micro-drones. M. Sébastien PROTHIN, post-doctorant recruté par le RTRA était en charge de ce troisième volet de l'étude.

Un des buts, durant le contrat de post doctorat de Sebastien Prothin (2011-2012) a été d'étudier une nouvelle configuration de rotor coaxial, dans le but de garantir la maniabilité du véhicule tout en enlevant les surfaces de contrôle inutiles qui augmentent la sensibilité aux rafales de vent.
Cette étude visé à étudier une version modifiée d'un contrarotatif classique, dans lequel les rotors peuvent être inclinés de manière à créer des forces et des moments de dérive potentiellement utilisables pour la maniabilité.
Lorsque les rotors rotatifs sont inclinés, ils ne sont pas coaxiaux et des effets gyroscopiques sont créés. La complexité d'un mécanisme de plateau cyclique a été remplacée par un mécanisme d'inclinaison qui été assurée par des servomoteurs classiques. Un travail parallèle, et développé plus tard, à consister en la recherche d'une solution de type « morphing », utilisant un matériau électroactif.

Dans le prototype étudié (*S.Prothin and J-M. Moschetta*, 2013), la direction de la poussée des deux rotors peut être redirigée par les une inclinaison latérale et longitudinale des rotors. Un modèle théorique du mécanisme a été mis au point sur la base d'un modèle mécanique qui comprend les forces, moments et les effets gyroscopiques induites par les pièces en rotation. En plus de l'approche théorique, un dispositif expérimental a été mis au point (**Fig. 5**). Il est basé sur l'utilisation d'une balance à 5 composantes permettant de mesurer les efforts et moments résultants des différentes inclinaisons. Ce prototype a permis d'analyser, et de mieux comprendre les mécanismes d'interaction mis en jeu dans ce type de mécanique.

En parallèle de cette étude, et dans l'optique d'une utilisation de ce type de propulsion dans le domaine des nanodrones, Sebastien Prothin à travailler à l'étude de faisabilité et la conception de ce type de mécanisme en utilisant, non plus des servomoteurs électromécaniques, gourmand en énergie et pénalisant le bilan de masse, mais plutôt des matériaux de nouvelle génération, de type « *Smart material* », cette étude faisant suite à celle de Ang Bang Sun (post doctorant RTRA, 12 mois 2010-2011), sur les IPMC (*A.B. Sun* et al., 2013)

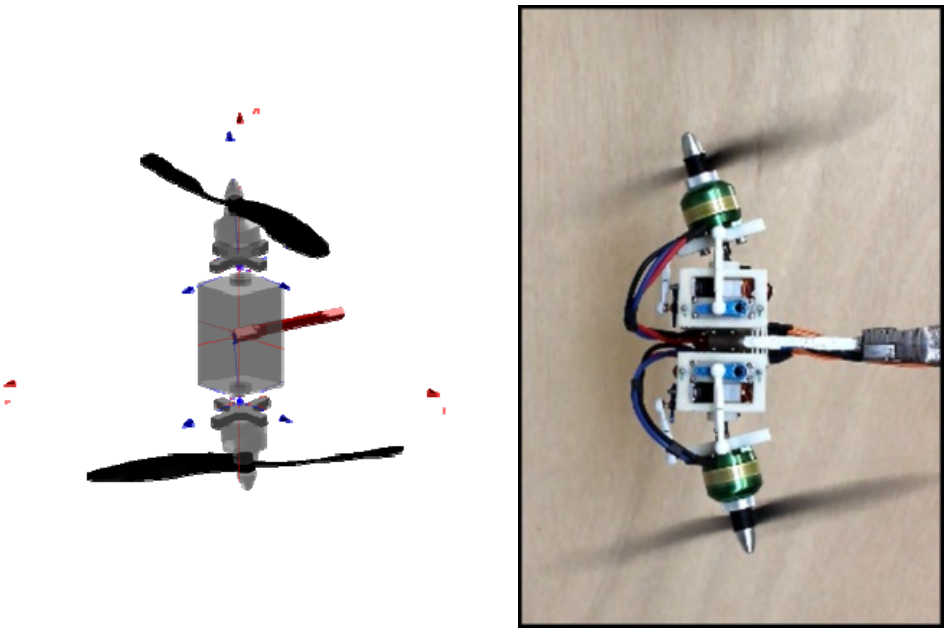


Figure 5 :
Modèle (gauche) et Prototype expérimental (droite) de birotor à poussée vectorielle (*S. Prothin,* 2011)

Suite aux travaux de A.B. Sun, il a été montré l'incompatibilité des actionneurs, de type IPMC, avec certaines des applications envisagé au sein du laboratoire. Et plus particulièrement, l'application « Poussée vectorielle » visant à orienter le ou les rotors d'un micro ou nano drone (*S.Prothin*, 2013). C'est dans ce sens que c'est ouvert la collaboration avec le Laboratoire de Physicochimie des Polymères et des Interfaces, (EA 2528) de l'université de Cergy Pontoise, sous la direction de F. Vidal et C. Plesse. Ce laboratoire développant des actionneurs à base de polymères électroactifs « *RIP Nbr/PEDOT* », ayant des caractéristiques et performances répondant aux critères recherchés.
Ces polymères conducteurs ont fait l'objet d'une forte attention dans le monde en tant que matériaux actifs pour la réalisation de nouveaux actionneurs électrochimiques, précurseurs de « muscles artificiels », du fait de leur légèreté, de leur relatif faible coût, de leur capacité à générer des forces élevées ainsi que de leur faible tension d'utilisation. Ces matériaux sont composés de deux éléments principaux, une membrane conductrice ionique et deux électrodes interpénétrées de polymères conducteurs électroniques.

L'implication de Sebastien Prothin, (post doctorant RTRA, 12 mois 2011-2012) dans la thématique d'actionneurs électrochimiques s'inscrit donc à trois niveaux :

- La synthèse et caractérisation de membranes présentant une architecture de type réseaux interpénétrés de polymères (RIPs) pour lesquels une co-continuité de phase des deux réseaux partenaires est recherchée. Cette morphologie permet ainsi de combiner au sein du même matériau les propriétés propres de chaque réseau, une bonne conductivité ionique

(généralement un réseau POE) et de bonnes propriétés mécaniques (élastomères).

- L'élaboration d'actionneurs à base de polymères conducteurs électroniques à façon pour une application donnée (*Concept « Rosace »,* **Fig. 6***, S.Prothin, 2012*). Ces objectifs en terme de performances (force, vitesse, amplitude de déplacement - paramètres rarement conciliables) ou de dimensions (épaisseur) nous permettent ainsi d'orienter nos travaux tout en approfondissant notre connaissance de ces systèmes.

- L'élaboration et la caractérisation de capteur utilisant ces mêmes matériaux, permettant in fine, leur intégration dans le domaine de la métrologie aérodynamique (embarquée ou non).

Les applications de ces matériaux dans le domaine de l'aéronautique, et plus particulièrement, dans le domaine des drones, sont quasi inexistantes, permettant ainsi la forte synergie de cette collaboration. Celle-ci étant renforcée par le besoin croissant des « chimistes » d'applications de leurs matériaux, et d'un besoin d'actionneur/capteur, de la part des mécaniciens.

Une application majeur, qui nous a poussés à nous intéresser à cette collaboration et à ces matériaux, n'est certes pas une application directe de notre domaine de compétence, mais représente une certaine analogie, au sens de l'actionnement, recherché dans le concept de « Rosace » (développé durant le post doctorat de Sebastien Prothin, et qui fera l'objet d'un premier prototype dans le chantier Dynamorph). Cette application concerne, la société BVS, spécialisée dans la vision intelligente et la perception artificielle, qui a contacté le LPPI afin d'évaluer les potentialités des actionneurs développés au laboratoire à être intégrés dans des systèmes de perceptions biomimétiques, plus particulièrement pour y remplacer les technologies classiques d'actionnement et de capteur. A été réalisé (*C. Plesse*, 2010) l'intégration de ces matériaux dans deux prototypes de systèmes de perceptions biomimétiques, le premier visuel imitant les muscles oculomoteurs (**Fig. 7**) et le deuxième tactile imitant les vibrisses du rat. C'est la première de ces applications qui nous a poussés à entreprendre cette collaboration.

Figure 6 :
Concept de birotor à poussée vectorielle
« Rosace »
(S. Prothin)

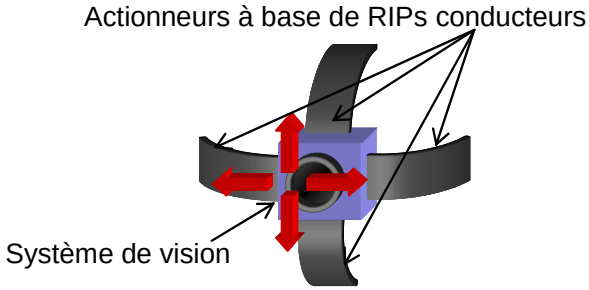


Figure 7 :
Représentation schématique
d'un premier prototype de système de vision biomimétique commandé par des actionneurs à base de RIPs conducteurs

C. Plesse, A. Khaldi, N. Festin, P. Pirim, E. Cattan, D. Teyssie, C. Chevrot, F. Vidal, (2010). "Conducting IPNs Based Electrochemical Actuators : from Polymer Chemistry to Biomimetic Integration" *International Conference and Exhibition on New Actuators and Drive System*, 444-447.

- **Partenaire LAPLACE**

The contribution of LAPLACE is centered in the vicinity of the research axis combining the investigation of novel smart materials, the modeling of fluid structure interaction and experimental validation of the designed concepts. The primary objective of this research project was the development of new smart materials capable of significantly modifying and hence improving the aerodynamic characteristics of an airfoil. This work included the design of smart material based actuation mechanisms for different time scales. The developed mechanisms should be able to control the flight as well as improve the aerodynamic characteristics of the load-bearing surface. Two technology demonstrators are to be realized and investigated experimentally in the wind-tunnel at IMFT. These demonstrators will be designed using novel numerical fluid-structure interaction approaches. Furthermore, the principle material properties are to be investigated and improved for a more efficient and dynamic flight control and performance optimization.

State of the art

Shape morphing of aircraft structures in order to modify the aircrafts lift and drag characteristics has been a subject of interest for quite some time. The first aircraft developed by the Wright brothers actually used wing twisting for flight control. Over time more rigid structures were used in order to increase the load the aircraft could

carry. Unfortunately this also traded the shape morphing capabilities for discrete control surfaces. Recent advances made in the field of smart-structures have renewed the interest in this field (McGowan, 1998).
Up to now, local actuators (ailerons, rudders, flaps) are used to reduce the drag, increase lift, separate attenuation and improve safety and control. Among the used technologies, vortex generators (Rogers, 2002), piezoelectric actuators (Nogarede, 2003), shape memory alloys (Manzano, 2006) and MEMS (IUTAM Symposium Procs, 2006) are of interest.
Piezoelectric actuators are defined by an electro-mechanical coupling. In other words subjected to a mechanical stress a charge is generated and vice versa an applied voltage induces a mechanical deformation in the material. Piezoelectric materials were tested by the Galea, et al. as active buffet suppression and control systems for next generation fighter aircrafts (Galea, 2003). They applied piezoelectric materials on the fin of an F/A-18 fighter aircraft tested in the wind tunnel. Researchers at DELFT University in the Netherlands replaced the ailerons of a micro-UAV with prestressed piezoelectric bimorphs (Barrett, 2005). Their research showed significantly higher roll authority on the piezoelectric actuated UAV. Furthermore, Eurocopter developed a piezoelectric stack based actuation mechanism for the active control of the trailing edge of a helicopter blade (Enenkl, 2002).

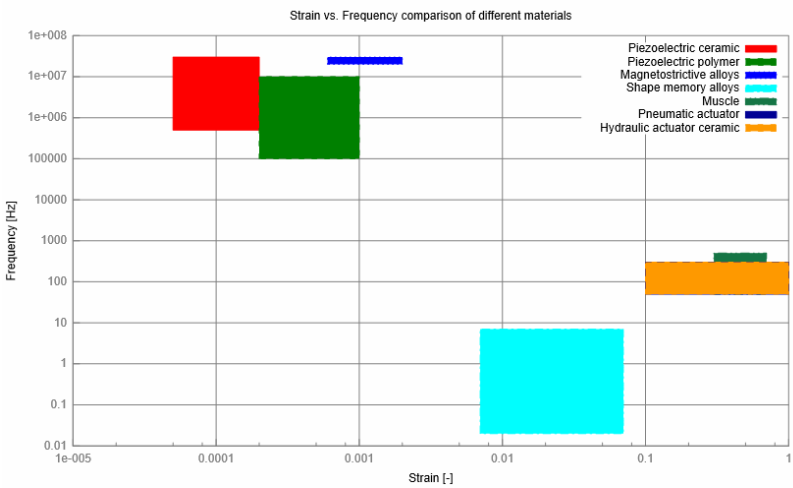


Figure 7 Strain vs. Frequency comparison for different material types

Whereas piezoelectric materials are defined by an electro-mechanical coupling shape memory alloys (SMA) are defined by a thermo-mechanical coupling. They are able to produce a large displacement over a large range of stresses. The so called shape memory effect is caused by a change in the crystalline structure induced by temperature variations. Two crystalline states can be distinguished. The martensitic phase is characterized by a lattice crystal structure which allows easy deformations of the material. After heating the crystals rearrange forming a cubic structure. This crystal phase is known as Austenite. During the transformation from Martensite to Austenite the material regains the form it was trained to keep. The change in the crystalline structure is reversible which makes this kind of material an interesting candidate for smart structures. Manzano used shape memory alloys to develop a single degree of freedom pulley mechanism to achieve the curvature of a hyper elliptic cambered span (HECS) wing. Barbarino et al. proposed a rib architecture

actuated by SMAs to change the chamber of an airfoil (Barbarino, 2010). Using a diamond shaped rib structure Sofla et al. developed an SMA actuated beam. Their research focused on the cyclic degradation of the SMAs over N actuation cycles. They proposed a pre-straining of the used SMAs in order to reduce the cyclic degradation.

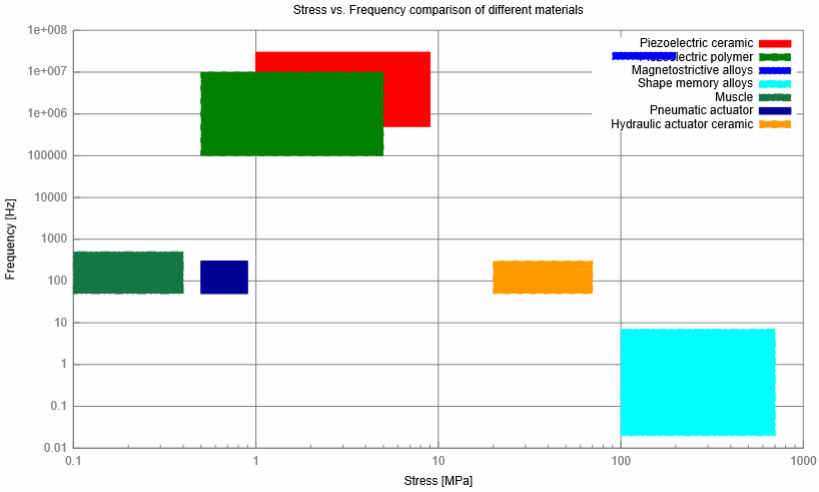


Figure 8 Stress vs. frequency comparison for different material types

No matter the implementation the governing factor of the actuator performance is still the material performance. The data shown in Figure 7 and Figure 8 clearly illustrates the benefits of both SMAs and piezoelectric actuators. Whilst SMA allow for large stresses over a wider strain range they remain limited in their actuation frequency due to the thermo-mechanical nature of the actuation. Piezoelectric actuators on the other hand allow for a far wider range of actuation frequencies yet compared to SMA actuators their stress and strain is quite limited.

Méthodologie/Methodology

As mentioned in the state of the art one of the main issues with the different materials is there limited operating range. In other words the limited frequency range of the SMA actuators and the limited strain of the piezoelectric materials have to be addressed as illustrated in Figure 9.

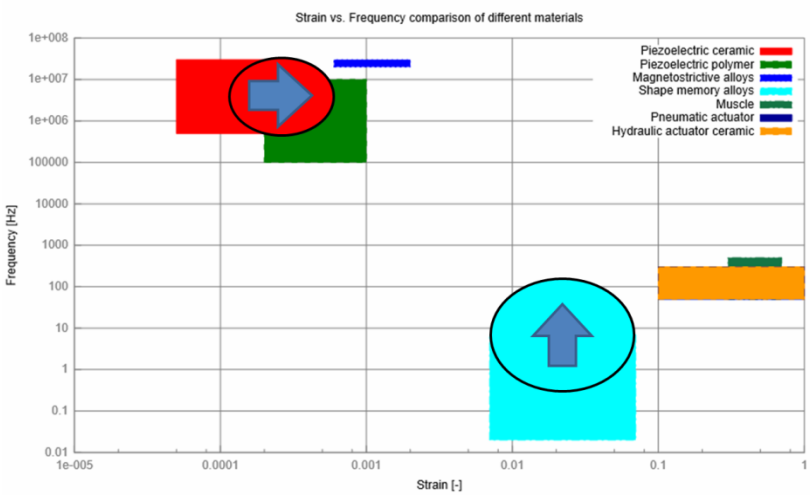


Figure 9 Material performance increase during EMMAV

Therefore, in a first step the different materials were studied separately. With respect to the SMA based actuation the material was first characterized in order to gain a better understanding of its fundamental properties such as the hysteresis effect occurring during the phase transformation. Since the effective material deformation depends on the strain of the material a mechanism was developed maximizing the length of the used material and thereby maximizing the obtained deformation. This mechanism was then integrated into a prototype. The prototype showed the feasibility of the mechanism creating an effective deformation of 10 % of the chord length. The prototype was then tested in the S2 wind tunnel of IMFT.

Two main issues were identified during the first experiments: the actuation frequency and the hysteresis effect. In order to address the issue of control a theoretical model for the SMA deformation was created and a control parameter was identified. With respect to the actuation frequency of the SMA actuators a closer look was taken at the behavior of the material during the entire actuation cycle. The cooling period was identified as the main bottleneck and consequently two different cooling mechanisms were studied, the cooling using Peltier elements and the cooling of the SMAs using forced convection. Since the Peltier elements presented significant design challenges the cooling via forced convection was chosen for a second prototype. The test results with this second prototype showed a 10 times increase in the achievable cycle time.

Similarly the actuation using piezoelectric elements was characterized. Since the achievable deformation using these actuators is limited different amplification mechanisms were studied. A new amplification mechanism was developed allowing for bidirectional amplification of piezoelectric stack actuators in a large range of frequencies. The development was optimized using numerical simulation tools. Different configurations and interface elements between the stack actuators and the amplification mechanism were evaluated. Based on the optimum design a first prototype was fabricated with a 20 times amplification of the achievable deformation of the piezoelectric stack actuators. This prototype was then incorporated into the structure holding the SMA actuators as a trailing edge flapping mechanism. The mechanism was experimentally validated.

PVDF flap actuator with low frequency actuation (10Hz) has been carried out (Long project of 3rd year students-LAPLACE-ENSEEIHT), Action in the shape of electrical application points to enhance the deformation of the film (Master project of L. Havez 2010).

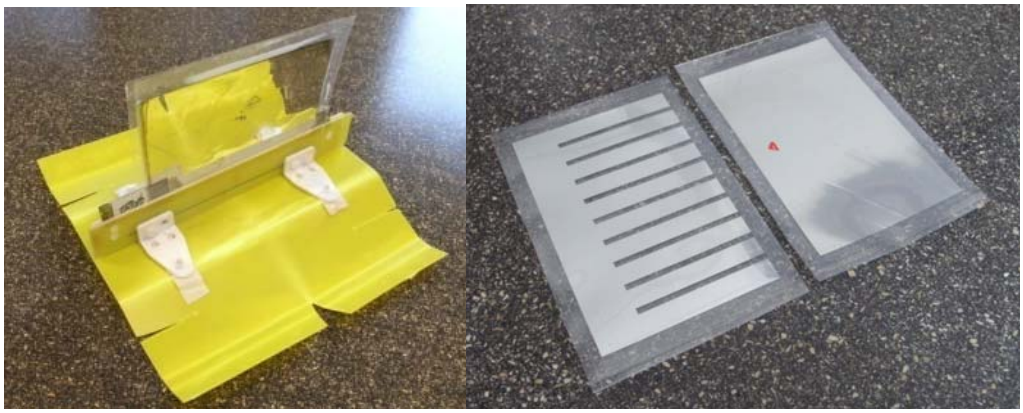


Figure 10. Sensor faculty Master project of Leon Havez

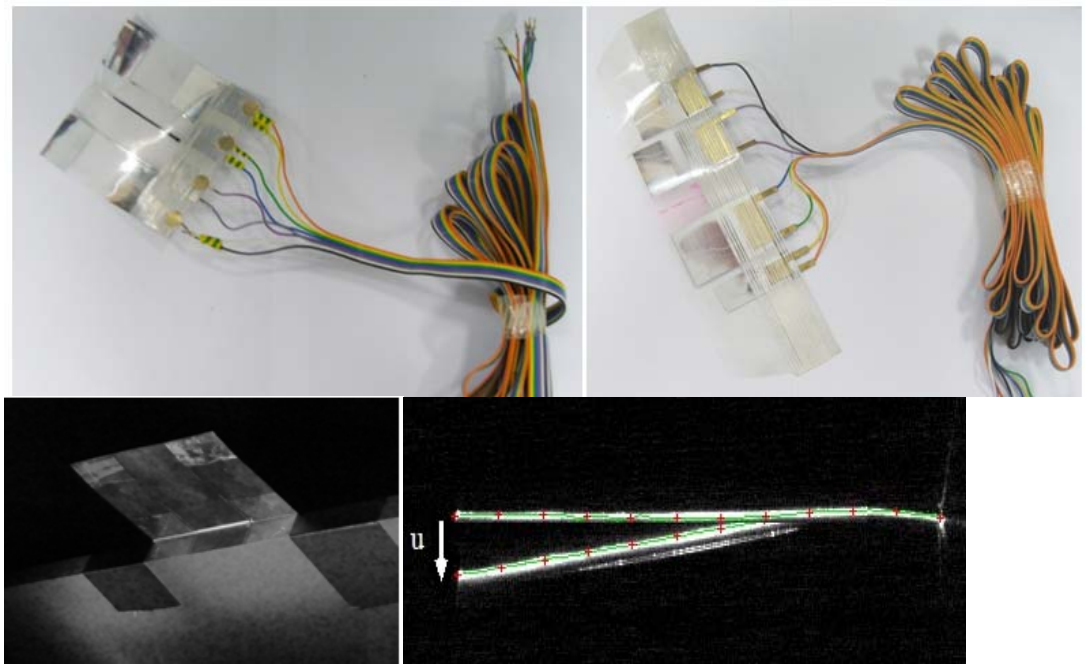


Figure 11. Actuation of PVDF at the trailing edge of an aileron - master project of S. Ruiz, (2011)-LAPLACE-ENSEEIHT. Caracterisation of electroactive properties for operation as active 'feathers'.

PVDF and Silicone

Going more to biomimetism, Feathers, realization of bending actuator with PVDF and silicone coupling of electrostatic and piezoelectric effects.

Aeroelasticity is an important property for flying objects and a golf ball is a perfect example of an object having better lift due to its deformed aeroelastic surface. To

bring about deformation in an aircraft wing to increase lift and reduce drag, a feather-like structure at the trailing edge of the wing has been proposed (Guerrero et al, C. R. Mécanique, Vol. 340, 2012). The research activity started to be studied in EMMAV project is to have a piezo-electric (PVDF) and electro-static coupled feather, to be able to measure and control its stiffness during different phases of flight. To perform this project, accurate knowledge on properties of PVDF and its actuation have to be obtained. After the design and implementation of the above structure, it is expected to be tested under the wind tunnel, to capture accurate results for higher efficiency.

Résultats marquants/Principal results-LAPLACE

Since the different actuator technologies were studied separately in the beginning the results shall be presented in a similar manner. With respect to the SMA based actuation mechanism first and foremost the development of a technology demonstrator incorporating SMA actuators into a deformable structure shall be mentioned. The developed prototype allows a total deformation of 36 mm which represents 10 % of the chord length as shown in Figure . This prototype was successfully tested in the S4 wind tunnel at IMFT and the basis for the further improvement of inherent properties of the used smart material technology.

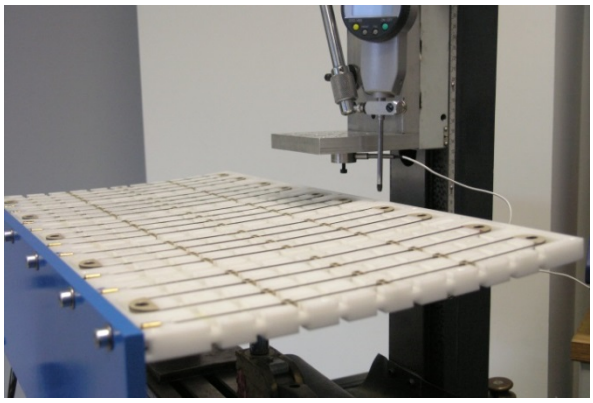


Figure 12 Prototype incorporating SMA actuators

Following the successful test in the wind tunnel a theoretical model of the SMAs behavior was developed by Dr. M. Chinaud. As the SMA actuators are heated using the Joule effect the theoretical problem is essentially a description of a cylinder heated via the Joule effect. In this cylinder the convection is determining the thermal distribution inside the cylinder. The boundary condition is fixed on the exchange surface of the cylinder by taking account the natural convection. The difficulty of this problem is to take account of the temperature dependence of each parameter. Parameters like radius, electrical resistance or thermal conductivity depend of the Martensite-Austenite ratio and hence on the temperature. However it is possible to describe the 2D dynamic thermal behaviour at one given crystalline phase. This allows simplifying the equation system. By considering a metal cylinder with a radius *R*, the governing equation for the heat conduction problem is (Bhattacharyya, 1995).

$$\lambda_i \frac{1}{r} \frac{\partial\left(r \frac{\partial T(r,t)}{\partial r}\right)}{\partial r} + q_i = C_i \frac{\partial(T(r,t))}{\partial t}. \qquad (1)$$

Where λ and C represent respectively the thermal conductivity and the heat capacity. In this formulation, we assume that the spatial temperature dependence is only governed by the special variable r. The internal heat production is considered to be constant. The equation can be solved using the boundary conditions:

$$T(r,t=0) = T_0, \qquad (2)$$

$$-\lambda_i \frac{\partial T}{\partial r}(r=R,t) = h(T(r=R,t) - Tamb), \qquad (3)$$

where h represents the convection coefficient. The solution yields:

$$T^t(r,t) = \frac{2}{R^2} \sum_{n=1}^{\infty} e^{\left(-w_n^2 c^2 t\right)} A_n J_0(w_n r), \qquad (4)$$

where $c^2 = \lambda / C$ and w_n represents the roots of the equation and $J_0(w_n r)$ being a first order Bessel function. A_n can be calculated with the boundaries conditions. We find:

$$A_n = \frac{w_n^2}{\left(\frac{h^2}{\lambda^2} + w_n^2\right)\left[J_0(w_n R)\right]^2} \int_0^R r T^t{}_0(r) J_0(w_n r) dr \qquad (5)$$

This theoretical model was then validated experimentally. As the model suggests the temperature during the experiments increased exponentially before stabilizing on a maximum value. This value is governed by the properties of the SMA wire under study, the ambient temperature and the current intensity. These predictions are validated by the experimental results for different current intensities shown in Figure .

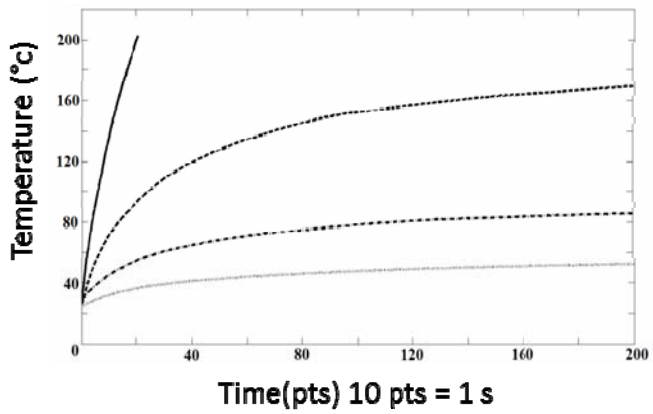


Figure 13 View of the Temperature of an SMA wire during the heating process at different intensity current: 8A (solid line), 5A (dashed line), 3A (-.) and 2A (..).

The validated theoretical model enabled the definition of a parameter controlling the deformation of the SMA actuators. This control parameter was identified to be the electrical resistance of the SMA wire under study. The variation of the resistance can be described by the variation of the length of the SMA wire and hence the length and consequently the deformation are a function of the effective resistance as given in the formula below.

$$R = R_0\left(1-\frac{x}{L_0}\right)^K . \qquad (6)$$

The parameter K was experimentally determined to be 0.7 for the different current intensities (4 and 8 A in ther experiments).

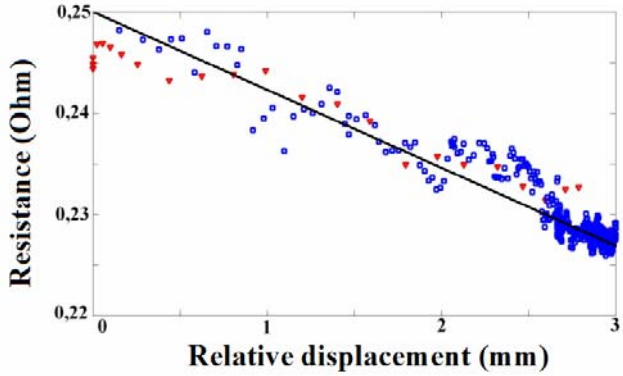


Figure 14 Electrical resistance versus the relative displacement of the SMA. The intensity current is I = 8A (s) and I = 4A (£). The theoretical law (solid line) gives K=0.7

The measurement allowed computing the electrical resistance of the SMA. Together with the previous experiments it was confirmed that the resistance can be considered an image of the crystalline phase of the SMA. SMA resistance seems to be independent of the current intensity and the decreasing of the resistivity with the augmentation the Martensite proportion. Electrical resistance remains the better parameter to control the relative displacement of the SMA wire while the current intensity is chosen as the control parameter of the temporal dynamics of the SMA's relative displacement.

In addition to the theoretical description of the SMA's dynamic behaviour and the development of a control parameter for both relative displacement and temporal dynamics the improvement of the latter was also an issue. Using forced convection we were able to decrease the cooling period by a factor of 4 allowing a far higher actuation frequency as shown in Figure .

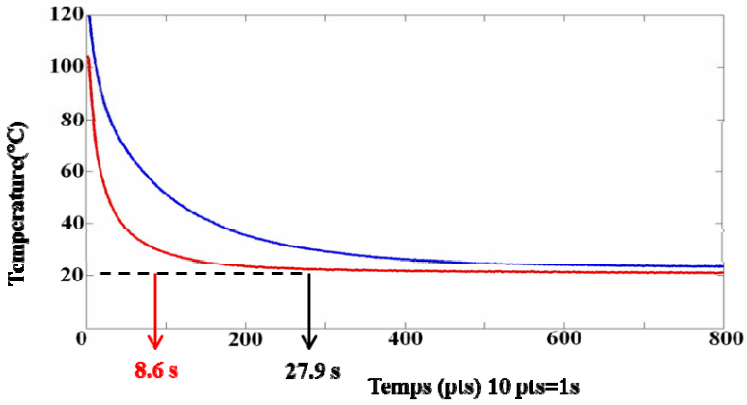


Figure 15 Comparison between the cooling response with natural convection (blue line) and the forced convection (red line).

In parallel to the studies conducted on the SMA actuators a piezoelectric actuation mechanism was developed. The mechanism was based on the lever principle increasing the deflection of the piezoelectric stack actuator by applying its deformation close to the neutral plane of a flap as illustrated in the Figures 16 and 17.

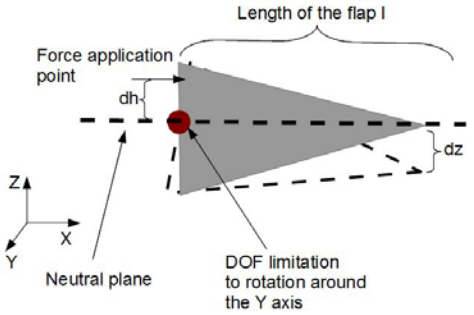


Figure 16 Schematic illustration of the piezoelectric amplification mechanism (Sideview)

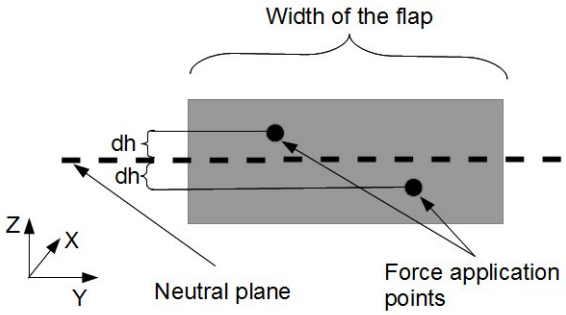


Figure 17 Schematic illustration of the piezoelectric amplification mechanism (Backview)

Bi-directional deformation is achieved using a hemispheric interface between the flap and the piezoelectric stacks. This interface is also used to apply the necessary pre-stress to the piezoelectric stacks. To validate the concept and determine the optimal distance to the neutral plane for the piezoelectric stack actuators different finite element models of the system were constructed using the commercially available FEM software ANSYS. Using this approach and the optimum distance from the neutral plane was determined (compare Figure). Two models were fabricated one in aluminum and one out of a polymer using a 3d printing process which is shown in Figure 19. Both prototypes were evaluated at LAPLACE for different frequencies (see **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** for results at 25 Hz) and the aluminum prototype is currently being tested in the wind tunnel at IMFT.

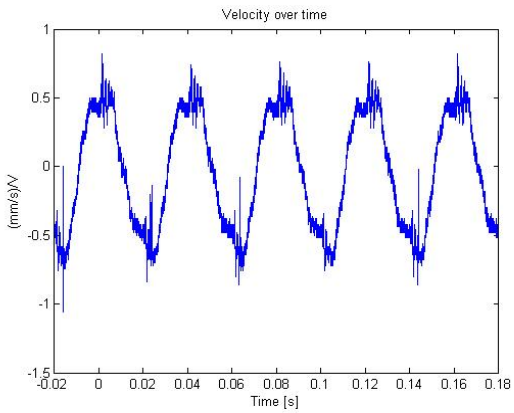


Figure 18 Velocity for 800 V Square signal at 25 Hz

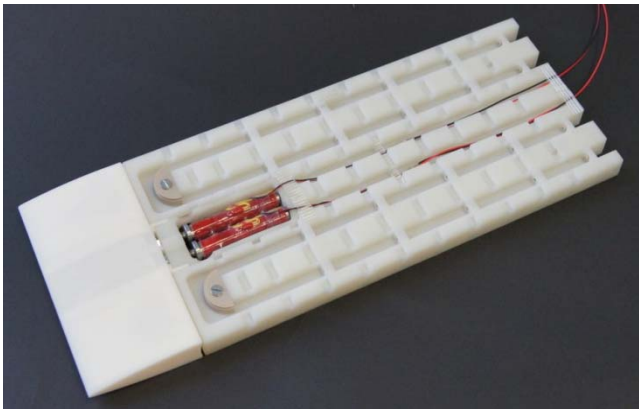


Figure 19 Prototype with SMA and piezoelectric stacks

Main outcomes of electromechanical coupling:

Throughout the course of this project two primary material technologies were investigated. The so called shape memory alloys, which are a metal composite defined by its thermo-mechanical coupling, and the piezoelectric elements, which are crystals defined by an electro-mechanical coupling. Similar to other smart materials each of the studied elements has certain advantages and disadvantages. The issues for the shape memory alloys were the limited frequency of deformation due to the

large cooling period and the hysteresis effect between crystal phases. The issues were addressed by developing a cooling mechanism based on forced convection and a mathematical model for the shape memory alloys. The mathematical model yielded the resistance *R* of the alloy to be the control parameter of choice in order to control the displacement. By applying the cooling mechanism a four times improvement in the dynamics of the actuation were feasible.
With respect to piezoelectric actuation the main disadvantage was the limited deformation of the elements. This issue was addressed by the development of a piezoelectric amplification mechanism enabling bi-directional flapping. This mechanism led to a 25 times increase in achievable deformation. The piezoelectric mechanism was both modeled numerically and tested experimentally and results indicated that the design can be evaluated in the wind-tunnel.
To put it in a nutshell, three primary objectives were achieved: the development of a control parameter for the SMA deformation, the increase in actuation frequency of the SMA actuators via forced convection and finally the increase in the achievable deformation of piezoelectric stack actuators via an amplification mechanism.

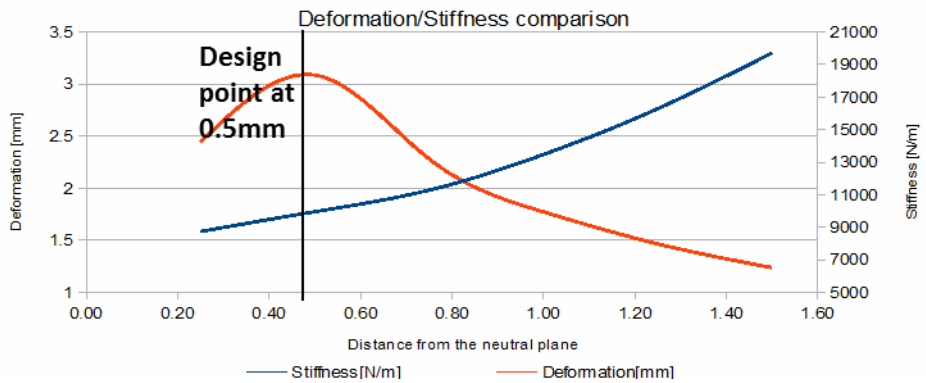


Figure 20 Stiffness (blue) and deformation (red) achieved in function of the distance to the neutral planefor a flap of 58 mm

---

- Partner IMFT (Coordinator)

L'IMFT a réalisé une modélisation fluide-structure de haute fidélité (modélisation **CFDSM-HF**), afin de capter les instationnarités et instabilités que l'on souhaite atténuer par le morphing.

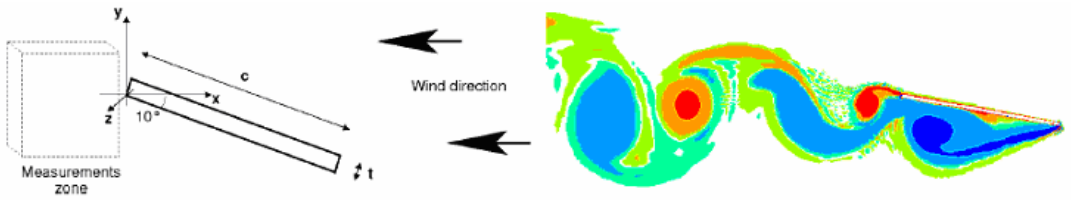
--Dans la partie CFD (Computational Fluid-Dynamics), les transferts turbulents ont été efficacement modélisés à l'aide d'approches de macrosimulation avancées, telles que OES, (Organised Eddy Simulation), (Braza et al, 2006, 2010, 2012) et la DDES (Delayed Detached Eddy Simulation), améliorée par l'OES (Bourguet et al, (2008) ; Braza et al (2012)).

--Des approches de modélisation d'ordre réduit (**Reduced Order Modelling**) ont été également dévéloppées en vue de substitution à la modélisation HF, pour réaliser une optimisation de forme par le Morphing (Bourguet et al, 2009, 2011). Ces approches ont été développées dans l'objectif d'une étroite synergie entre les

expériences et les simulations, dans le contexte d'hybridation des deux approches en vu d'élaboration, par assimilation de données, d'une base de modes les plus énergétiques du système dynamique fluide-structure fiable pour ses capacités prédictives pour le design des aéronefs.

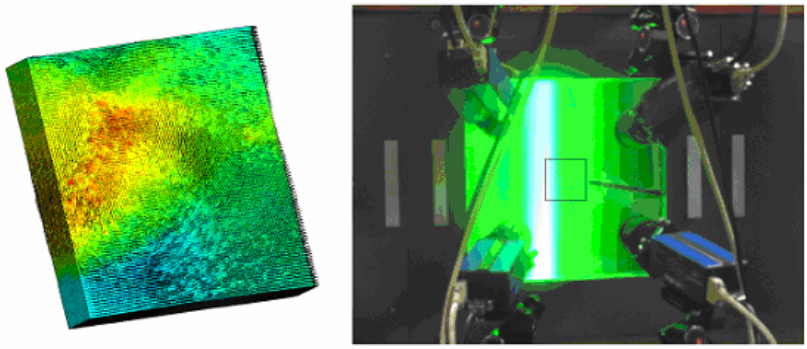
--Des mesures très détaillées par la méthode optique de Particle Image Velocimetry, rapide (**TRPIV**) et Tomographique (**PIV3D**) ont été effectuées. Ces mesures ont quantifié la modification de la structure de l'écoulement fortement décollé, instationnaire en aval du volet, par comparaison avec la configuration statique. Nous avons étudié la *modification* du décollement, des instabilités du bord de fuite telles que le mode de von Karman et le détachement tourbillonnaire de type Kelvin-Helmholtz, de plus petite taille, mais crucial pour le bruit aérodynamique en aval du bord de fuite. Le concept du morphing mise en œuvre, exploitant l'action de fil de Nitinol (LAPLACE) au plus près de la fibre neutre de la plaque ont permis d'aboutir à une flèche en bout de plaque de 36 mm, ce qui constitue déjà un résultat très intéressant dans le contexte de l'interaction fluide/structure où il s'agit d'obtenir des déformées importantes sans perte de raideur, et même en la renforçant.

--Des comparaisons entre les approches expérimentales et de simulation sur la configuration générique d'aileron (plaque en incidence) ont permis l'inter-validation des approches expérimentale et de modélisation, puis la construction d'une base de données **hybride** pour son utilisation à l'élaboration de modélisation réduite de haute capacité prédictive.



(a) (b)

Figure 1: Schematic representation of the flow configuration (a). The frame origin is on the trailing edge at the half of the plate's span. View of phase-averaged iso-vorticity field, CFD simulations by Ouvrard et al (2010), (b). IMFT



(a) (b)

Figure 21 Simulations numériques de l'interaction fluid-structure autour d'un volet deformable au nombre de **Reynolds de 200,000** et realisation des experiences en PIV-Tomo en soufflerie S4 de l'IMFT. Post-docs de H. Ouvrard et de E. Deri respectivement.

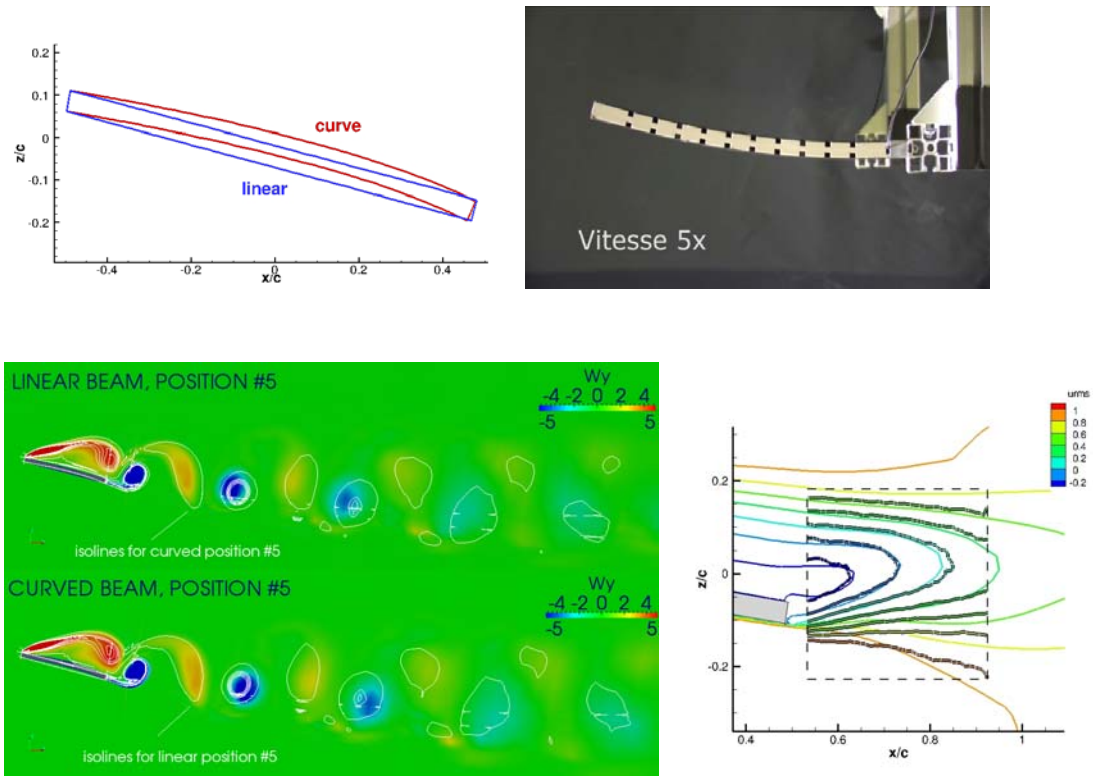


Figure 22 Simulations numériques de l'interaction fluid-structure autour d'un volet déformable au nombre de Reynolds de 200,000 en trois dimensions par l'approche de modélisation OES (Organised Eddy Simulation). Déformation par SMA (Shape Memory Alloys). Analyse spectrale des modes d'instabilité en aval du bord de fuite. La fréquence de 24 Hz correspond au mode de von Karman, alors que le 'bump' fréquenctiel autour de 505 Hz, au mode des troubillons de Kelvin-Helmholtz. Post-doc de T. Deloze.

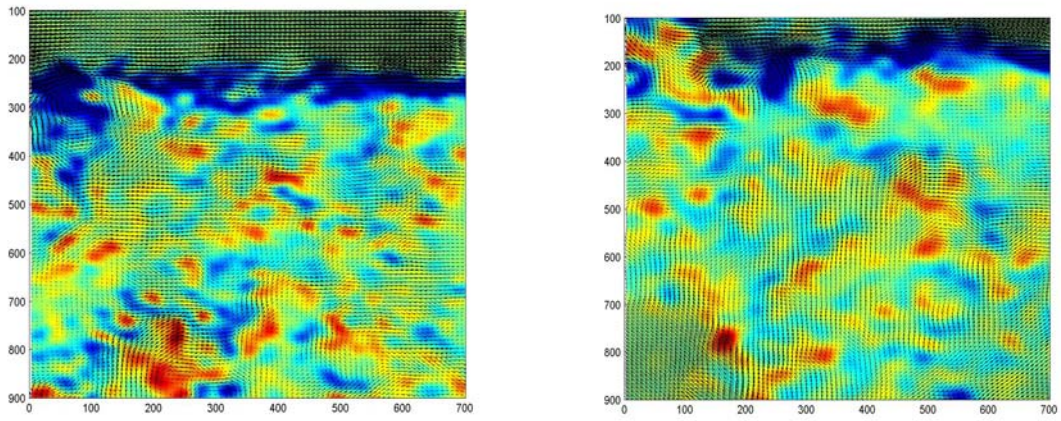


Figure 23. Comparaison des champs de vitesse des cas statique et dynamique (actuation par SMA-LAPLACE) en aval de la plaque (située en haut à droite de chaque figure), obtenus par TRPIV (Time-resolved PIV) en soufflerie S4 de l'IMFT avec la contribution du service « *Signaux-Images* » . Post-doc de M. Chinaud.

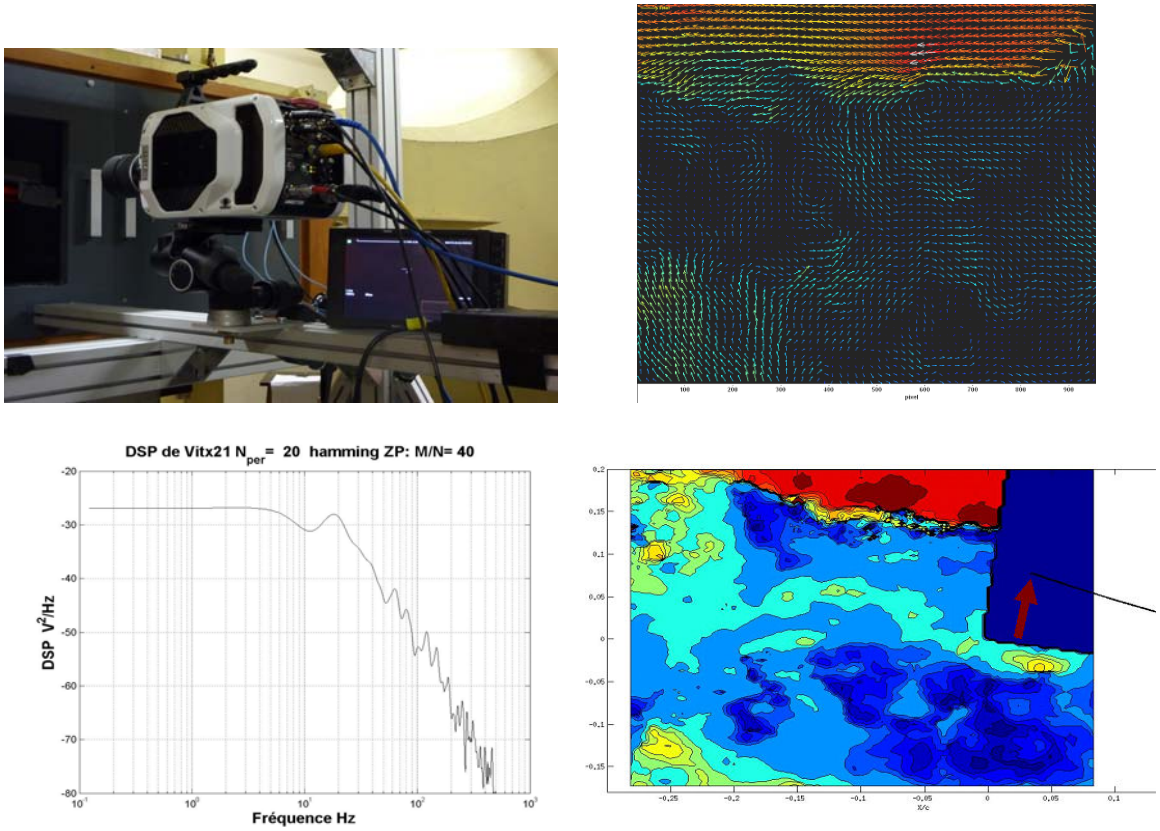


Figure 24. En haut : acquisition par caméra ultra-rapide de 6KHz mise à disposition à l'IMFT par la Sté « Vision Research » ; mesure du champ de vitesse en aval de la plaque déformable. En bas : Fréquence du mode de von

Kármán mesurée par les champs de TRPIV : ~24 Hz, en bonne comparaison avec la modélisation numérique, au nombre de Reynolds de 200, 000 (2 x 10^5). Pos-docs de M. Chinaud et d'E. Deri.

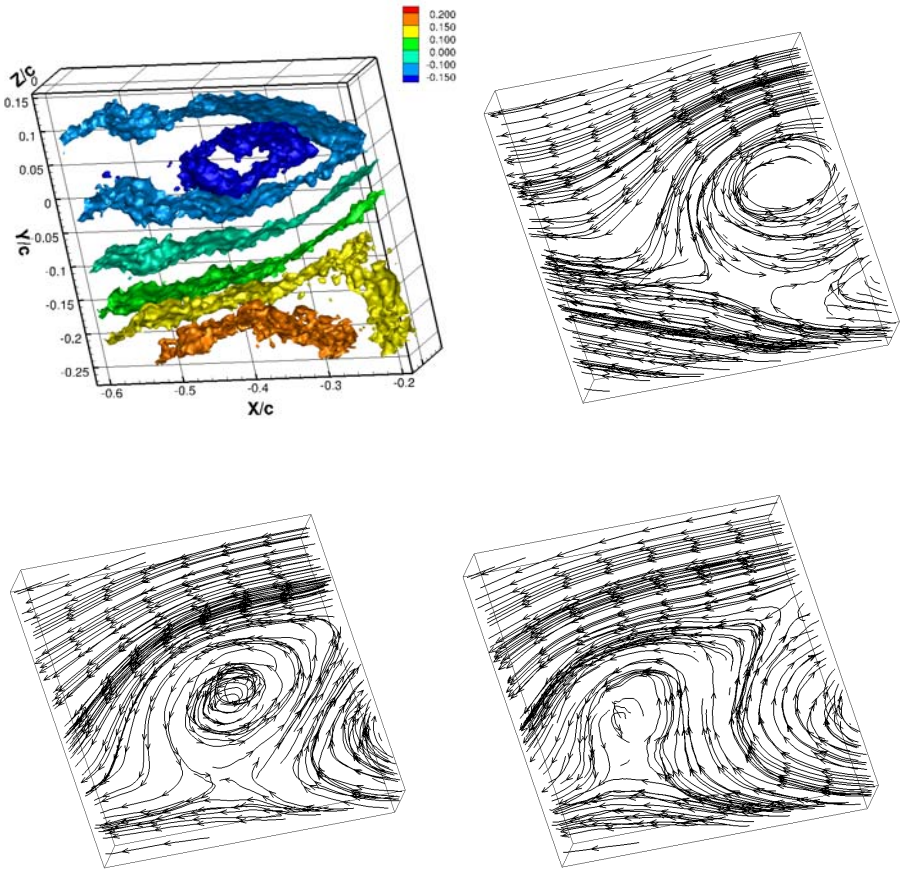


Figure 25. Moyennes de phase de la vitesse et des lignes de courant 3D obtenues à l'aide de l'approche « Proper Orthogonal Decomposition, à partir des résultats de la PIV-Tomo (Post-doc de E. Deri - J. Fluids & Struct, 2013) autour du volet déformable au nombre de Reynolds de 200 000.

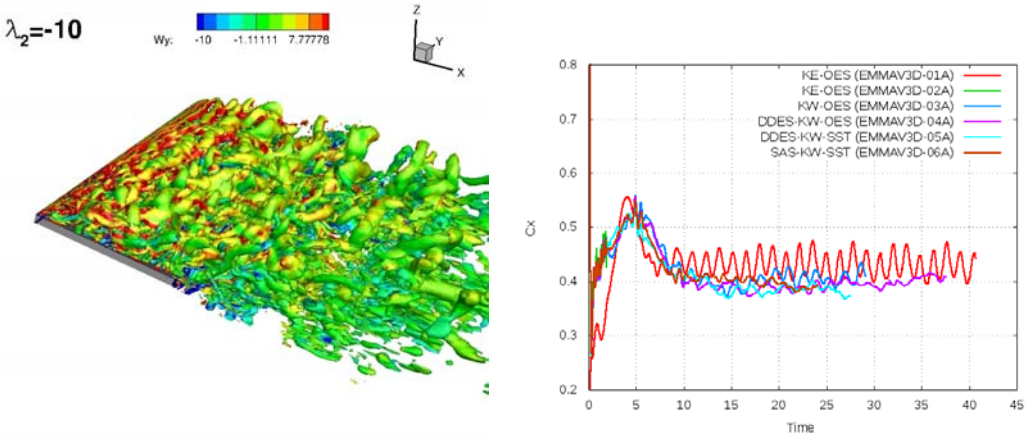


Figure 26. Simulation numérique du développement de la turbulence 3D autour du volet et force de traînée, par l'approche DDES-OES (Delayed Detached Eddy Simulation couplée avec Organised Eddy Simulation) autour du volet déformable au nombre de Reynolds de 200 000. Post-doc de T. Deloze.

La figure 21 montre les résultats obtenus par la PIV-Tomo pour le volet en configuration statique au nombre de Reynolds de 200 000 et par simulaiton numérique par l'approche de macrosimulation de la turbulence OES, développée à l'IMFT au cours des dernières années. Cette partie de l'étude a mis en évidence le développement des structures tourbillonnaires en aval du bord de fuite, qui devront être modifiées par le morphing électroactif (actuation SMA). La réalisation de la PIV-Tomo au sein du projet EMMAV a été une 'première' sur le plan international, en ce qui concerne un écoulement gazeux à nombre de Reynolds élevé (post-doc de E. Deri) avec le concours du service 'Signaux-Images'de l'IMFT (S. Cazin, E. Cid, M. Marchal, J.F. Alquier) et de la société « La Vision », qui a mis à notre disposition le système d'acquisition et le logiciel de la PIV-Tomo). La figure 25 montre l'analyse par moyenne de phase, effectuée à l'aide de l'approche 'Proper Orthogonal Decomposition' et des résultats et une comparaison entre cette expérience et les simulaitons numériques effectuées par le post-doc T. Deloze. Ces résultats sont consignés dans une publication au J. Fluids & Structures, à paraître.

La figure 23 montre l'effet du morphing sur les structures tourbillonnaires du bord de fuite au même nombre de Reynolds (200 000). L'acquisition par PIV rapide a bénéficié entre autres de la caméra mise à disposition par la Société « Vision-Research' en collaboration avec le service « Signaux-Images » de l'IMFT et a permis de capter la dynamique tourbillonnaire à une fréquence d'échantillonnage de 6KHz, ce qui est également une originalité en l'état de l'art et permet d'analyser d'une manière fiable les amplitudes du mode rapide des tourbillons de Kelvin-Helmholtz, responsable du bruit aérodynamique et sa modification à l'aide du morphing. Ce volet de l'étude a été réalisé par le post-doc de M. Chinaud, en collaboration LAPLACE-IMFT. Dans une étape en cours, au sein du projet Dynamorph nous étudions la relation d'actuation-réponse afin d'atténuer l'amplitude de ce mode, bien quantifié à l'aide de la présente base de données obtenue grâce à EMMAV.

La figure 26 montre des résultats obtenus par T. Deloze la structure de la turbulence 3D autour du volet, obtenue par simulation numérique au nombre de Reynolds de 200 000 par l'approche **hybride** DDES-OES (Delayed Detached Eddy Simulation couplée à l'Organised Eddy Simulation, Braza (2012), Conf. plénière, USA). Les fluctuations de basse fréquence des coefficients aérodynamiques globaux ont été bien simulés par notre approche, en comparaison avec des approches plus classiques qui ont eu tendance d'atténuer l'amplitude des modes de l'instabilité.
De ces faits, notre approche de 'Haute-Fidélité' permet une capture significative des modes à atténuer par le morphing et une bonne comparaison des fréquences dominantes avec les expériences EMMAV.

I-2 : Applications potentielles à l'industrie et aux services ; degré de maturité (TRL) actuel (1 à 3 pages) :

Les applications potentielles intéressent les domaines de vol de microdrones et des UAV, ainsi que l'optimisation de forme d'aéronefs tels que les ailerons du bord de fuite, les pales de rotors, les pales d'éoliennes, des 'bumps' en écoulement transsonique (phase de vol de croisière des avions civils), en ce qui concerne la technologied es ailes dites 'laminaires' : position de la transition laminaire-turbulente en amont de la zone de l'interaction de choc-couche limite (voir figures ci-après). Ces applications concernent les programmes européens en cours : TFAST ('Transition location effects in shock-wave induced separation', programme EU - Level 1), SARISTU ('Smart Intelligent Aircraft Structures'- programme EU - Level 2) en cours, se situant entre TRL1 et TRL3 respectivement. Le projet EMMAV a commencé avec des études relevant du 'Technology Readiness Level : TRL1 ("Basic principles observed and reported ; Scientific research begins to be translated into applied research and development (R&D)"). Les concepts développés ensuite au sein d'EMMAV, qui préparent ainsi de nouveaux modes d'actuation pour les drones et UAV ainsi que pour le 'smart wing design' des avions souples de prochaine génération, ont réussi à s'inscrire dans le degré de maturité du TRL2 (« Technology concept and/or application formulated ; invention begins. Once basic principles are observed, practical applications can be invented").
A la fin du projet EMMAV, cerains partenariats ont été obtenus avec des acteurs industriels principaux en aéronautique européenne et des invitations à participer à des projets du TRL3 sont alors envisages, notamment au sein du 'JTI-Clean Sky'.

Dans un contexte plus fondamental, a l'aide du projet EMMAV, des drones équipés de systèmes biomimétiques pourront être envisagés dans de futurs projets ainsi qu'au terme du chantier SMARTWING, imitant les concepts d'oiseaux tels que l'Albatros, qui utilise 'savamment' les gradients de vitesse près de la surface de la mer afin de volet sans effort et de parcourir de très longues distances. Ces concepts pourront être étudiés au sein du chantier MAVRCDes concepts de 'bio-inspiration' quant à l'actuation des plumes electroactives du bord de fuite pourront être étudiés plus en détail au sein du projet DYNAMORPH et constituent dans l'état de l'art des concepts qui préparent les intérêts industriels (ex. études menées au sein de Boeing) et projets européens tels que AFLOWNEXT-Airbus.
Le projet EMMAV a aidé à établir récemment une collaboration avec l'équipe Biomimétique du prof. Hedenström de l'Univ. de Lund, Suède, qui sera développée au sein du chantier SMARTWING. Cette collaboration pourra contribuer grandement à la mise en œuvre de concepts de bio-inspiration. Nous utilisons plutôt ce terme car pour l'échelle d'un aileron d'avion, les concepts utilisés par les oiseaux ne sont pas directement transposables, à cause du nombre de Reynolds.

Outre les aspects d'aéronautique, le projet EMMAV a donné suite à une collaboration dans le domaine de 'Ground-Transportation' avec PSA, en ce qui concerne le morphing de 'car-bumpers'.
Nous présentons ci-après des exemples des applications industrielles citées précédemment.

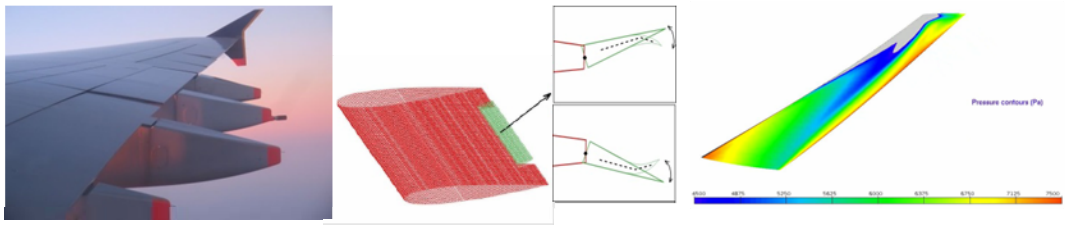


Figure 0.1 **TC1**: Wing – aileron in low subsonic speeds

Figure 0.2 **TC2**: Wind turbine blade and rotor.

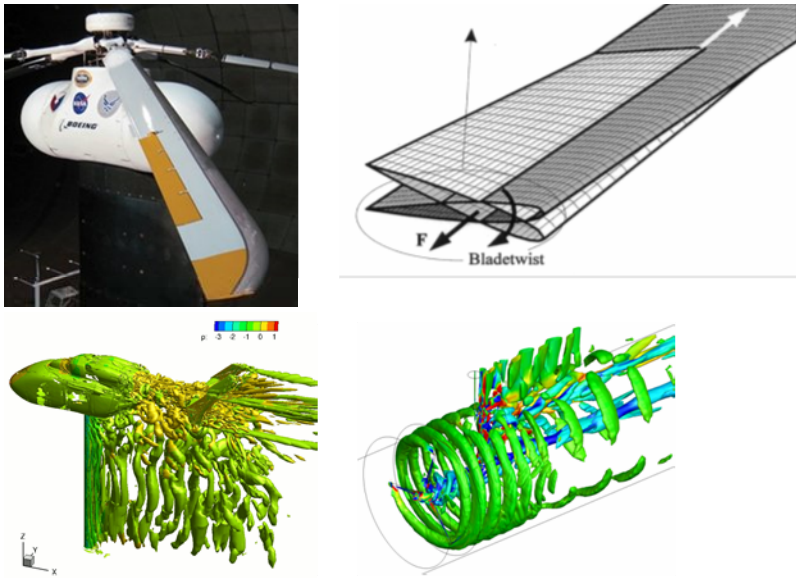


Figure 0.3 **TC3**: Helicopter blade twist – Smart rotor illustration (ATAAC - EU Program).

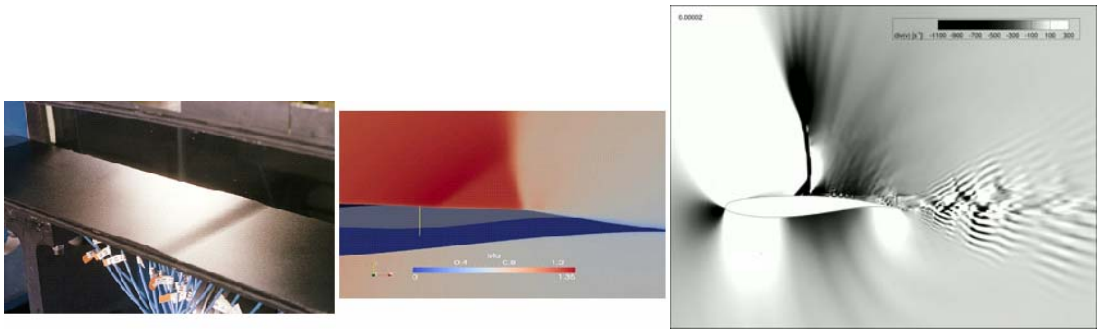


Figure 0.4 **TC4**: Active bump; application to transonic interaction (right: ATAAC and TFAST-EU programs).

I-3 : Collaborations internationales. 1 établies ; 2 potentielles (1 à 3 pages)

Les collaborations internationales établies à l'aide du projet EMMAV sont nombreuses. L'ISAE a développé une forte collaboraiton avec les Universités de Floride, de Taiwan et de Münich, à l'aide des invitations des Professeurs Thyopias, Albertani et Rüsser, respectivement. **L'impact de l'invitation de 'chercheurs-senior' par le RTRA-EMMAV a été important** quant au dépôt de brevet (ISAE) et de contribution au développement de logiciel de l'interface fluide-structure (IMFT-LAPLACE) à l'aide des invitations des Professeurs Rüsser et Thiele.
A l'aide du projet EMMAV, des collaborations au niveau européen ont été renforcées : un partenariat d'une vingtaine d'instituts de recherche (tels que Imperial College, Tech. Univ. Berlin, Univ. Manchester, EPFL-Lausanne, entre autres et d'industries (EDF, PSA, EADS, …) est intéressé à l'élaboration d'une proposition européenne sur le Morphing.
Au niveau international, la présentation des activités EMMAV au sein de la Commission gouvernementale des USA mandatée par la NSF (National Science Foundation) au cours des années 2010-11, ont permis de développer des collaborations avec le MIT et l'Univ. de Brown (USA) incluant des post-doctorants.

Au niveau national, des collaborations ont été renforcées à l'aide du projet EMMAV avec l'ICA (Institut Clément Ader), l'IMT (Institut de Mathématiques de Toulouse et l'ONERA (DCSD) et ont permis d'élaborer le chantier SMARTWING au sein du RTRA et son projet DYNAMORPH.

I-4 : Difficultés rencontrées et/ou échecs (1 à 3 pages) :

Obviously, the EMORPH project is an innovative approach to treat the issue of new concepts for actuation and morphing, covering different scales from nanodrones to ailerons, with specific differentiation of the concepts as a function of the targeted scale.
Another new issue including risk was to enable the new electro-active structures to operate in low energy consumption. Such an attempt can never be free of risks, but it has been treated in the EMMAV project thanks to the properties of the piezo-

actuators and of the electroactive polymers to act as captors and actuators: therefore, the environing vibrational energy can be captured and redistributed for the actuation purposes.

The consortium that contributed to the goals of EMMAV, by the solid experience of the partners involved in the related topics explained above have been able to design concepts that reduced these risks.
Furthermore, tThe main issues as previously mentioned were the characteristics of the materials under investigation. That is to say, the limitations in the operational range which had to be addressed. In the EMMAV project, we had to deal essentially with the large cooling time and hysteresis effect of the SMA actuators which had to be addressed in order to ensure an efficient operation. With regards to the piezoelectric actuators the amplification of the deformation in an elevated frequency range (~100 Hz) was an issue which had to be resolved. In order to increase this frequency range even further a piezoelectric bender based actuator has been constructed in EMMAV and is currently under study in the wind tunnels. This bender should be capable of frequencies >400 Hz with deformations similar to the amplified piezoelectric stack with a moderate energetic cost. The characterization of this morphing facility will be studied in the DYNAMORPH project.

I-5 : Suites envisageables à ce projet (1 à 3 pages) :

Le projet EMMAV a permis d'envisager de nombreuses suites dans l'élaboration de partenariats nationaux, européens et internationaux.
-Sur le plan national, deux chantiers RTRA ont été créés, MAVRC (Micro-Air-Vehicle research centre, https://sites.google.com/site/mavresearchcenter/) et SMARTWING (incluant le Smartwing Morphing Centre, www.smartwing.org). Ce dernier inclut le projet DYNAMORPH, commencé en novembre dernier et les deux chantiers sont d'une durée de 4 ans. Ces chantiers et projet incluent un nombre conséquent de partenaires régionaux potentiels, dont le LAAS, l'ENAC, l'ONERA…

Des projets ANR sont en cours d'élaboration pour l'actuation intelligente et le morphing, incluant un projet de création d'une plate-forme ANR.

-Sur le plan européen, le projet EMORPH (**E**lectroactive **Morph**ing for aeronautics configurations) a été élaboré incluant 22 partenaires dont des instituts aéronautiques et des industries, incluant l'EDF et PSA entre autres.

-Sur le plan international, la collaboration avec le MIT et nombre d'Universités américaines, dont Texas-Austin, Brown, Cornell, … continue. Nombre des partenaires du projet EMMAV et des chantiers cités précédemment sont sollicités pour élaborer des projets au sein de la NSF.

Les résultats marquants du projet EMMAV, avec les premiers résultats du projet DYNAMORPH font partie d'un congrès international sous l'égide de l'ERCOFTAC (European Research Community on Flow Turbulence and Combustion), « *Unsteady Separation in Fluid-Structure Interaction* », www.smartwing.org/ercoftac, qui se tiendra à Mykonos, Grèce, du 17 au 21 juin 2013.

II- Indicateurs du projet :

II-1 : Liste des permanents ayant travaillé sur le projet et équivalent temps-plein (par laboratoire) :

ISAE:

J-M. Moschetta (Professeur ISAE/DAEP)
D. Bajon (Professeur ISAE/DEOS)
E. Benard (Professeur ISAE/DAEP)

LAPLACE:

J.F. Rouchon (Professeur INPT)
E. Duhayon (Maître de Conférences INPT)
B. Nogarede (Professeur INPT)

IMFT :

M. Braza (Directrice de Recherche CNRS)
G. Harran (Maître de Conférences INPT)
A. Sévrain (Maître de Conférences INPT)
R. Bourguet (CR-CNRS, ancien doctorant INPT)

II-2 : Liste des personnels contractuels recrutés par la Fondation, sur le projet (nom, laboratoire, fonction, thème)

C. Thipyopas (Professeur Univ. Bangkok) - Concepts de microdrones
R. Albertani (Professeur Oregon State Univ.) - Concepts de microdrones
P. Russer (Professeur, Technische Universität Munchen) - Actuation multi-échelle
F. Thiele (Professeur, Tech. Univ. Berlin) - Interaction fluide-structure (IFS)
Z. Liu (Doctorant DAEP) - Simulation numérique rotors microdrone
A.B. Sun (Postdoc RTRA/DAEP) Expériences physiques - microdrone
S. Prothin (Postdoc RTRA/DAEP) Expériences physiques, actiation, morphing microdrone
E. Deri (Postdoc RTRA/IMFT) Expériences physiques par Tomo-PIV et TRPIV - volet déformable par morphing
H. Ouvrard (Postdoc RTRA/IMFT) Simulation numérique IFS
M. Chinaud (Postdoc RTRA/LAPLACE) Expériences physiques volet déformable -TRPIV et morphing
T. Deloze (Postdoc RTRA/IMFT) Simulation nnumérique volet déformable/morphing

Liste de personnels contractuels non-recrutés par la Fondation, ayant travaillé au sein du EMMAV

J. Scheller (Master ISAE, puis Doctorant/LAPLACE/IMFT) - Actuation piezo
M. Amar (Master/LAPLACE) - Morphing par AMF
S. Ruiz (Master/LAPLACE) - Actuation et morphing par Polymères électroactifs

II-3 : Liste des publications issues directement de ce projet (en séparant les revues et les colloques) :

PUBLICATIONS DANS DES REVUES ET OUVRAGES SPÉCIALISES AVEC COMITÉ DE LECTURE

1. Z. LIU, JM. MOSCHETTA, N. CHAPMAN, R. BARENES and M. XU, (2010). "Design of Test Benches for the Hovering Performance of Nano-Rotors". International Journal of Micro Air Vehicle, 2(1): 17-32.

2. Z. LIU, R. ALBERTANI, JM. MOSCHETTA, C. THIPYOPAS, and M. XU, (2011). "An Experimental and Computational Evaluation of Small Micro Coaxial Rotor in Hover". Journal of Aircraft, 48(1):220-229. (SCI : 000287227200020).

3. R. BOURGUET, M. BRAZA, A. DERVIEUX, (2011) "Reduced-order modelling of transonic flows around an airfoil submitted to small deformations", *Journal of Computational Physics*, **230**(1), pp. 159-184.
4.

5. E. DERI, M. BRAZA, S. CAZIN, E. CID, C. DEGOUET, D. MICHAELIS, (2012) "Investigation of the three-dimensional turbulent near-wake structure past a flat plate by Tomographic PIV at high Reynolds number", J. Fluids & Structures, accepted for publication, to appear in 2013.

6. Maxime Chinaud, Johannes Scheller, Jean-François Rouchon, Eric Duhayon, Marianna Braza, Hybrid electroactive wings morphing for aeronautic applications, *Solid State phenomena*, accepted for publication to appear in 2013.
7.

CHAPITRES D'OUVRAGES

8. F. GROSSI, M. BRAZA, Y. HOARAU (2012) "Delayed Detached-Eddy Simulation of the transonic flow around a supercritical airfoil in the buffet regime", Series *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design,* Vol. ***117***.

9. M. GUAL SKOPEK, M. BRAZA, Y. HOARAU, F. THIELE (2012) "Hybrid RANS-LES modelling of a strongly detached turbulent flow around a tandem cylinders configuration", Series *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design,* Vol. ***117***.

CONFERENCES PLÉNIÈRES INVITÉES

10. J.F. ROUCHON, E. DUHAYON, M. BRAZA "Utilisation de l'énergie électrique non-conventionnelle en aéronautique", **Conférence Plénière invitée,** « Les Entretiens de Toulouse », rencontres aérospatiales Académie de l'Air et de l'Espace, Midi-Pyrénées Innovation, 23-24 avril 2012, Toulouse, Campus ISAE.

11. M. BRAZA "Turbulence modelling for strongly detached flows around bodies at high-Reynolds number, involving fluid-structure interaction", **Key-Note Lecture, EMI/PMC Congress,** Univ. Notre Dame, USA, 19 June 2012.

12. M. Braza (2012) Conférence Plénière, « Physique et modélisation de l'interaction fluide - structure impliquant des écoulements fortement décollés autour de corps épais à nombre de Reynolds élevé », **JAUM/AFM**, Journées de l'Association Universitaire de Mécanique, Rouen, 29-31 Août, 2012.
13. M. BRAZA, (2011) "Turbulence Modelling for strongly detached unsteady flows at high Reynolds number involving thin interfaces", invited conference, **Royal Society**, **UCL**, University College London, 7 October 2011.

14. M. Braza, R. Bourguet, H. Ouvrard, R. Perrin (2010) "Turbulence modelling for strongly detached unsteady high-Re flows, based on refined PIV experiments", **Key Note Lecture**, **CAIMS-SCMAI**, Canadian Symposium on Fluid Dynamics (CSFD-2010) , 17-20 July 2010.

BREVETS

15. Brevet : Actionneur multifilaire, D. BAJON, P. RUSSER, J-M MOSCHETTA, FR000002950756A1, Sept 2009.

ARTICLES EN CONSIDÉRATION/PRÉPARATION POUR PUBLICATION DANS DES REVUES SCIENTFIQUES AVEC COMITE DE LECTURE

16. A-B. SUN, S. PROTHIN, D. BAJON, JM. MOSCHETTA, E. BENARD, (2013). "Experimental exploration and modeling analysis of IPMC actuator performance for a coaxial Nano Aerial Vehicle". Journal of Sensors and Actuators A: Physical. (soumis).

17. S. PROTHIN, JM. MOSCHETTA, (2013). "A Vectoring Thrust Coaxial Rotor for Micro Air Vehicle: Modeling, design and analysis". Journal of the American Helicopter Society. (En cours d'écriture).

18. M. CHINAUD, J. SCHELLER, J F. ROUCHON, E. DUHAYON, D. HARRIBEY, M. BRAZA (2013) "Hybrid electroactive wings morphing for aeronautic applications", Solid State Phenomena, submitted to publication.

M. CHINAUD, A. BOUSSAID, J F. ROUCHON, E. DUHAYON, E. DERI, D. HARRIBEY, M. BRAZA (2013) "Thermo-mechanical coupling in Nitinol: application to an electro-morphing plate.", IEEE Journnal, submitted for publication.

CONGRÈS

19. C. THIPYOPAS, A.B. SUN, and JM. MOSCHETTA, (2011). “Application of Electro-Active Materials to a Coaxial-Rotor NAV”. International Micro Air Vehicle Conference and Flight Competition. September 12-15. ‘t Harde, the Netherlands.

20. A-B. SUN, D. BAJON, JM. MOSCHETTA, C. THIPYOPAS, (2011). “Preliminary study on the application of IPMC actuator for a coaxial Nano Aerial Vehicle”. 6th World Congress on Biomimetics, Artificial Muscles and Nano-Bio. October 25-27. Cergy-Pontoise.

21. S. PROTHIN, JM. MOSCHETTA, (2013). “A Vectoring Thrust Coaxial Rotor for Micro Air Vehicle: Modeling, design and analysis”. 48th International Symposium of Applied Aerodynamics. March 25-26-27. Saint-Louis, France.

22. F. MOHD-ZAWAWI, S. PROTHIN, P. LV, E. BENARD, G. MICHON, J. MORLIER, JM. MOSCHETTA, (2013). “Study of a Flexible UAV Proprotor”. 48th International Symposium of Applied Aerodynamics. March 25-26-27. Saint-Louis, France.

23. Jean-François Rouchon, Amar Boussaid, Dominique Harribey, Enrico Deri, Marianna Braza, « Activation d’une voilure déformable par des câbles d’AMF répartis en surface », 20ème Congrès Français de Mécanique, Besançon, 29 août au 2 septembre 2011.
24. Maxime Chinaud, Johannes Scheller, Jean-François Rouchon, Eric Duhayon, Dominique Harribey, Marianna Braza, Hybrid electroactive wings morphing for aeronautic applications, MSM2012, 8 to 12 October 2012.

25. Chinaud, M.; Boussaid, A.; Rouchon, J.F.; Duhayon, E.; Deri, E.; Harribey, D.; Braza, M.; , "Thermo-mechanical coupling in Nitinol. Application to an electro-morphing plate," Electrical Machines (ICEM), 2012 XXth International Conference pp.2580-2584, 2-5 Sept. 2012.

26. 1. M. CHINAUD, J. SCHELLER, J F. ROUCHON, E. DUHAYON, D. HARRIBEY, M. BRAZA (2012), "Hybrid electroactive wings morphing for aeronautic applications", July 8-13 2012, the 8th International Conference MSM, “Mechatronic Systems and Materials”, 2012, Bialystoc, Poland.

27. M. CHINAUD, A. BOUSSAID, J F. ROUCHON, E. DUHAYON, E. DERI, T. DE FARAMOND, M. BRAZA, T.DELOZE (2012), Large displacement SMA electro-morphing plate for wind tunnel experiments, august 19-24 2012, ICTAM (International Congress of Theoretical and Applied Mechanics) 2012, Beijing, China.

28. M. CHINAUD, A. BOUSSAID, J F. ROUCHON, E. DUHAYON, E. DERI, D. HARRIBEY, M. BRAZA (2012), "Thermo-mechanical coupling in Nitinol: application to an electro-morphing plate.", September 2-5 2012, 20th International Conference on Electrical Machines, Marseille.

Liste des ateliers internationaux réalisés au cours du projet (nom, date, invités étrangers)

*Meeting entre les partenaires EMMAV et TUB, 20 octobre 2010, IMFT. Invités, Prof. Thiele, Dr. J. Vos (CFS-Eng.).

* Meeting IMFT-ISAE avec le prof. Rüsser, novembre 2010, ISAE

*Meeting projet EMMAV et pre-kick-off du chantier SMARTWING, 16-17 Juin 2011, ENSEEIHT/LAPLACE et IMFT ; participants européens : FOI, Univ. Genova, Tech. Univ. Berlin, CFS-Eng, EPFL - Lausanne. Participants industriels : EDF, PSA, EADS, Piaggio, Alenia Aerospace.

*Congrès international « Unsteady separation in fluid-structure interaction », Mykonos, Grèce, 17-21 juin 2013, organisé sous l'égide de l'ERCOFTAC (European Research Community on Flow Turbulence and Combustion), préparé au cours du projet EMMAV et faisant partie du chantier Smartwing. www.smartwing.org/ercoftac

*Meeting ISAE-ENAC pour le vol de drones - Corse, Juin 2012

*Symposium ISAE-ENAC sur les microdrones, Septembre 2013, préparatifs commencés en 2012.

*Journées « Entretiens de Toulouse», 23-24 avril 2012, organisées par l'Académie de l'Air et de l'Espace, ISAE. Présentation des activités EMMAV par J.F. Rouchon et E. Duhayon (LAPLACE) et par M. Braza (IMFT) - Conf. invitée.

III- Message éventuel au RTRA STAE :

Date de rédaction du rapport final : 29 janvier 2013