

















# En3 - Utilisation de l'énergie électrique de manière non conventionnelle pour de meilleures performances avion

Marianna BRAZA (DR CNRS - IMFT)

Jean-François ROUCHON (PU - INPT)

Eric DUHAYON (MDC - INPT)

Mercredi 18 avril 2012



## La plate-forme ('chantier') SMARTWING

# «New concepts for improving the aerodynamic performances of airvehicles»

2012 - 2015











Fondation de Coopération Scientifique Sciences et Technologies pour l'Aéronautique et l'Espace

RTRA - Réseau Thématique de Recherche Avancée





# OBJECTIVES and ORIGINAL ASPECTS IN THE STATE OF THE ART

#### **ELECTROACTIVE MORPHING**

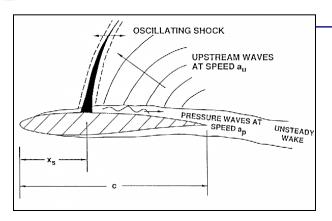
Shape optimisation for increasing performance and controlling instabilities and aerodynamic noise

- Optimisation of aerodynamic efficiency
- Real time: <u>Controller Design</u>
- Low energetic cost: recuperation and redistribution of environning vibratory energy by smart E-materials
- Replacement of hydraulic systems by electrical ones
- Loads control manoeuvrability trailing-edge ailerons
- Attenuation of instabilities due to separation and to aeroelastic flutter and of aerodynamic noise due to trailing edge K-H vortices
- APPLICATION: drones, ailerons, flexible wings, UAV, rotor blades

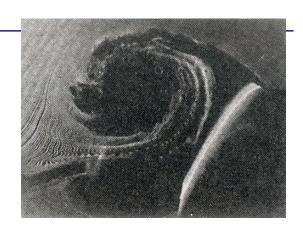
flying wing, active transonic bumps: laminar wing



### Instabilities occurring in aeronautics

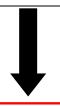








•Drag increase Vibrations



• materials fatigue • Reduction of the range of operation

Flutter phenomenon



Structure destruction

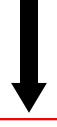


•Structure enforcement •Velocity reduction

Dynamic stall



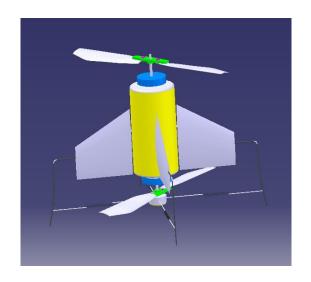
Sudden lift loss

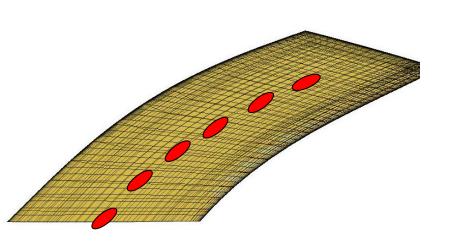


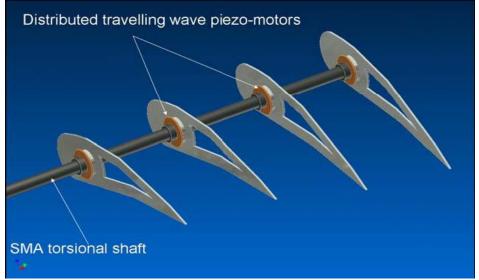
- Manoeuvrability limitation •Velocity reduction
  - (helicopter)



# Concepts d'actuation par morphing électroactif







- •SMA Shape Memory Alloys
- Distributed small piezo-actuators, No-MEMS
- Electroactive Polymers
  - Low actuation cost thanks to:
     Capacity of vibratory energy recuperation and restitution
  - Modification of the behavior laws of the Ematerial – solid structure



### **Electroactive morphing**

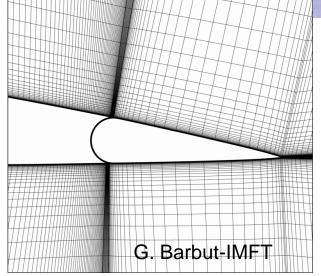


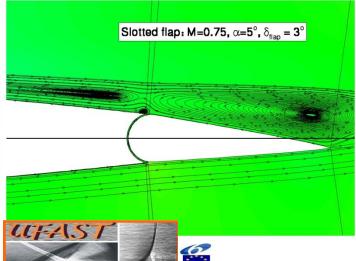
New aircraft generation with deformable wings and ailerons attending optimal shape in real time



# Ailerons, volets, gouvernes, rotors







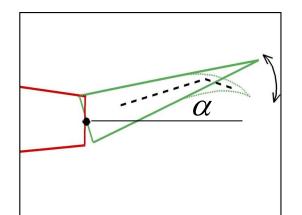


# **Morphing Electroactif**

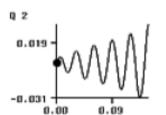
- SHAPE CONTROLLER DESIGN

- FLIGHT CONTROL COMMANDS AND EVALUATION

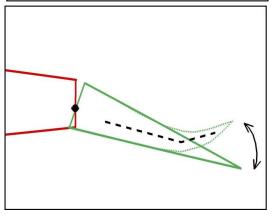
EXPERIMENTAL DEMONSTRATOR



$$\alpha \pm \varepsilon(t)$$



The optimal form is a function of  $\alpha$  and depends on M, Re flow regimes



Deformation is reached by continuously distributed E-materials according to optimum design shape









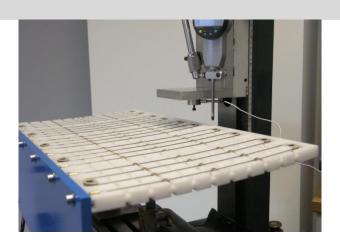








# ACTIVATION D'UNE VOILURE DEFORMABLE PAR DES CABLES D'AMF REPARTIS EN SURFACE



Publication Congrès Français de Mécanique, Besançon, sept. 2011

Jean-François ROUCHON<sup>a</sup>, Dominique HARRIBEY <sup>a</sup>, Enrico DERI <sup>b</sup>, Marianna BRAZA <sup>b</sup>

a. Laboratoire sur les Plasmas et la conversion d'Energie-LAPLACE-UMR CNR, 2 rue Camichel, 31071 TOULOUSE

b. Institut de Mécanique des Fluides de TOULOUSE- 1 Allée du Professeur Camille Soula, En3

En3

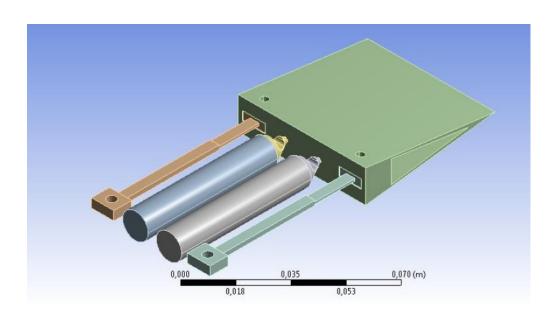
Equipment des Foulouse - 17 et 18 avril 2012



# PIEZOACTUATEURS PZT – MORPHING DU BORD DE FUITE DE VOLET/ AILERON



J. Scheller, J.F. Rouchon, M. Chinaud, D. Haribey 2012





### Enjeux du morphing en aéronautique

Réduction des consommations Réduction du bruit



réduction de trainée atténuation des couplages aéroélastiques

Différentes actions possibles sur :

La couche limite





La structure





Stries turbulentes

Ailerons de bord de fuite

Dévrillage de voilures souples

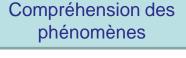
Déformation de grande amplitude

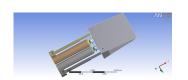
Compréhension des phénomènes

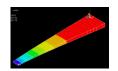


Etude de Faisabilité







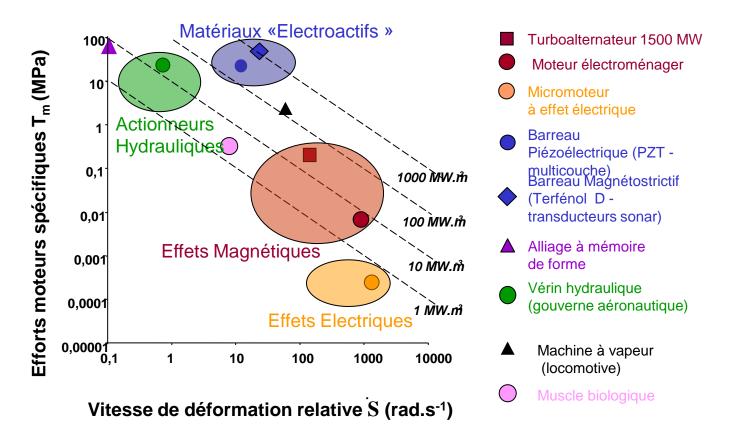






### Offre technologique

#### Comparaison des différentes technologies d'actionnement





### Propriétés des matériaux

### **Morphing Electroactif**

Influence sur l'écoulement : Déformation (cm)

Fréquence (1 Hz- 10Hz)

Influence sur la couche limite: Déformation (mm) Fréquence (1 kHz- 100 kHz)

Rappel sur les propriétés des matériaux:

Matériaux	Déformation relative	Contrainte maxi (Mpa)	Energie spécifique (J/g)	Température limite	Moyen d'activation	Ordre de grandeur	réversibili té	Vitesse
AMF	6%	200	15	800°C	Température (effet Joule)	100 °C	non	Lent
PZT	1000 ppm	500 (en compression)	0.013	150-300°C	Champ électrique	1000 V/mm	oui	Rapide
Magnétostrictifs	2000 ppm	70	0.007	150-300°C	Champ magnétique		non	Rapide
PVDF	0.1%	4.8	0.0013	70°C	Champ électrique	100V/µm	oui	Rapide

AMF: (EMMAV)

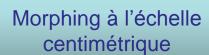
(SMARTWING/DYNAMORPH)

Actionneur PZT : Actionneur/Capteur

PVDF : Capteur



# Différentes technologies pour différentes échelles



Morphing à l'échelle millimétrique



Hydraulique

Magnétique





**Smart materials** 

Dynamique



Piezo materials

capteur



Piezo ou Polymère

Contrôle de déplacements centimétriques avec une déformation locale





# Aide au choix des matériaux électroactifs pour le morphing

5 Critères généralisés, pondérés en scénario :

Performance, Propriétés mécaniques, Fabrication, Intégration, R&D

Scénario 1 : Privilégie la performance au détriment de R&D

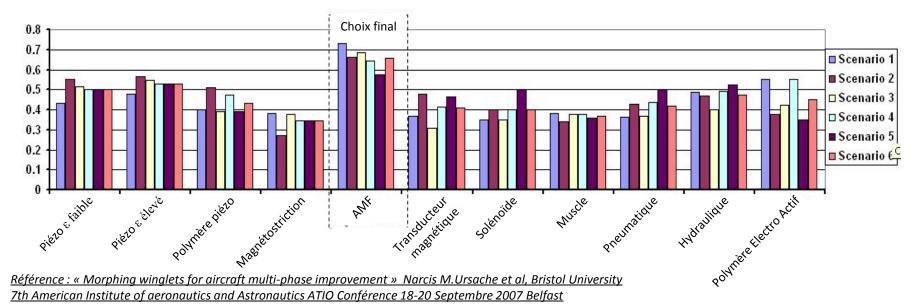
Scénario 2 : Privilégie les propriétés mécaniques au détriment de la Performance

Scénario 3 : Privilégie la Fabrication au détriment des Propriétés mécaniques

Scénario 4 : Privilégie l'Intégration au détriment de la Fabrication

Scénario 5 : Privilégie la R&D au détriment l'Intégration

Scénario 6 : scénario médian

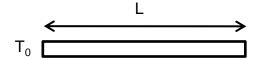


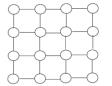


#### Principe de fonctionnement des AMF

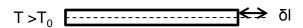
Principe de déformation de la plaque

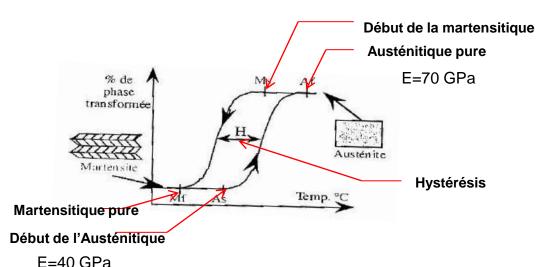
 $T_0$ : Température ambiante





Propriétés thermomécaniques des AMF Après transformation de phase





- •Une raideur contrôlable et contrôlante
- •Un amortissement variable en fonction de la phase



# Etude de faisabilité du dévrillage quasistatique de voilure souple par AMF

Programme CVF financé par la DGA, AIRBUS

#### Contrôle de forme par AMF distribués

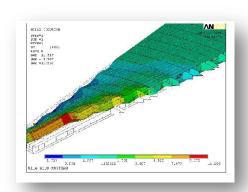


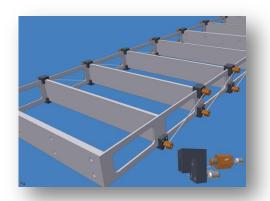


#### Vrillage de la structure

Action sur les 10 derniers caissons élastiques de la voilure de l'A380

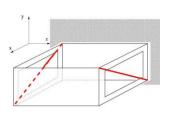
3° à 4° de vrillage

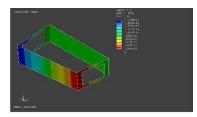






#### **Actionnement contra-diagonal par AMF**

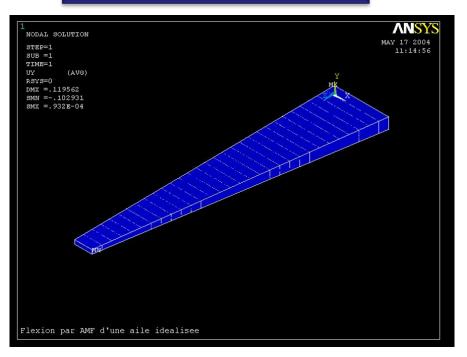






# Etude de faisabilité du dévrillage quasistatique de voilure souple par AMF

#### Sur une voilure à échelle 1



Force appliquée : 8.10<sup>5</sup> N

Energie élastique stockée : 5.4 kJ

Caractéristiques des fils de Nitinol: 490 J.Kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>

Enthalpie de transformation : 20kJ.kg<sup>-1</sup>

Energie totale requise: 463 kJ



1 kW est nécessaire si l'action est effectuée en 10 mn

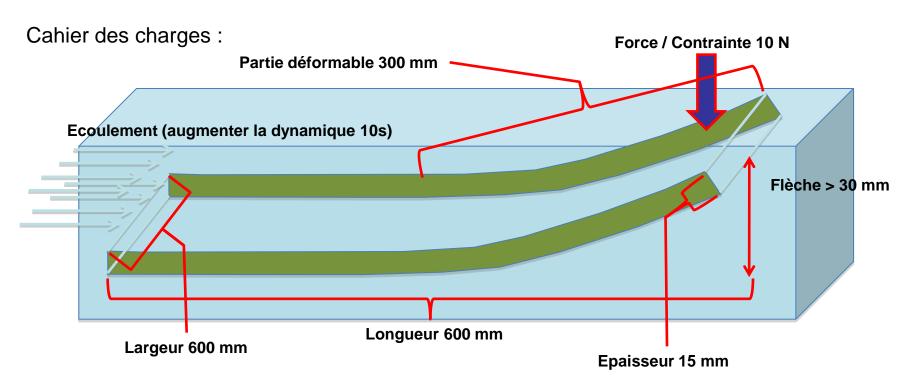


Masse totale: 10 kg



# Interaction fluide/structure Cahier des charges

Réaliser un dispositif d'étude expérimental des interactions fluides /structures qui devra permettre l'étude de l'écoulement en soufflerie pour deux conformations de plaques. Le temps de déplacement entre les deux configurations est d'environ 3s.





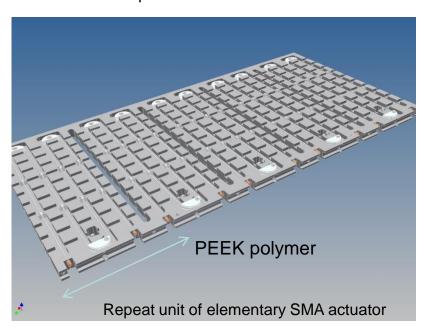
Difficulté technologique : assurer un actionnement dans une épaisseur de 15 mm



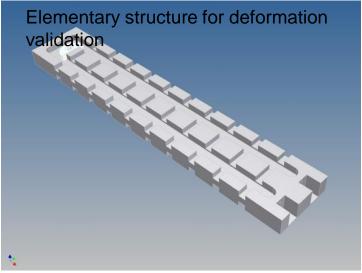
# Vers un Morphing dynamique de grande amplitude à base d'AMF

- •Meilleure adéquation souplesse de la voilure et du matériau actif, repenser la structure en vue de son morphing
- Associer le matériau actif AMF au contrôle de la raideur et de l'amortissement
- •Vers une augmentation des fréquences par un refroidissement optimisé
- •Paramètre de contrôle en position

View of the final plane with flexural DOF enhancement



 Low frequency deformed plane with SMA wires (Nitinol) – RTRA EMMAV project



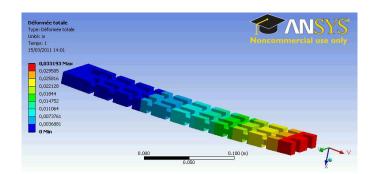


# Voilure déformable à base d'AMF (RTRA – EMMAV)

- Utilisation d'un alliage Nickel- Titane (Ti-Ni). NITINOL
  - Voilure déformable : polymère thermostable en PEEK (PolyEtherEtherKetone)
- Mise en température de l'AMF par effet Joule . Application d'un courant continu



Photographie du prototype de voilure déformable (LAPLACE)

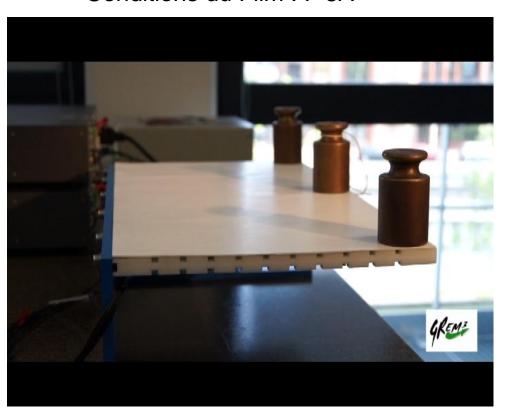


Modèle numérique d'un brin élémentaire



# Fonctionnement électromécanique de la Voilure déformable

Conditions du Film : I=8A

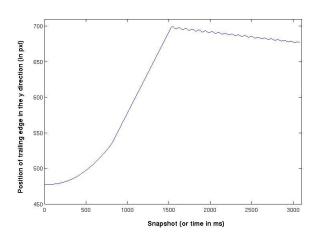




#### Caractéristiques obtenues :

Force de 30 N > 10 N Vitesse de levée sous 16 A : 1,5 s

Possibilité d'obtenir différents degrés de liberté : twist, flexion dans les deux sens





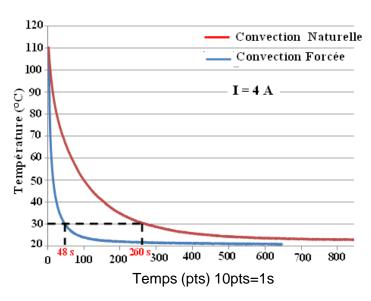
Inconvénient : temps de relaxation important en convection naturelle

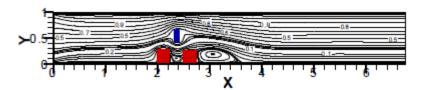


# Amélioration de la dynamique par refroidissement en convection forcée



Gainage du brin d'AMF avec obstacles servant de centrage et favorisant les échanges thermiques en régime turbulent





Pour les fortes intensités (I < 8A) :



Dynamique avec convection forcée de l'ordre 1à 5s

- Mise en place de la convection forcée sur le nouveau prototype
- Modélisation numérique de la dynamique temporelle :
- Contrôle de la résistance électrique.





### Paramètre de contrôle en position

Changement de phase cristalline : image de la déformation relative d'un brin élémentaire de 20 cm de longueur

Visualisation de l'effet d'hystérésis

Transformation de phase en fonction de la température

> Evolution de la résistance électrique durant le changement de phase d'un brin élémentaire de 20 cm de longueur

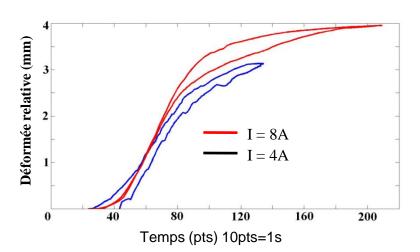
Contribution élastique

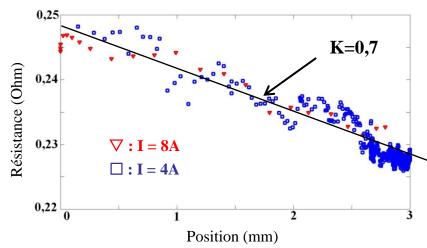
$$\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_{Br} = \left(1 + 2\nu\right) \frac{\Delta L}{L}.$$

$$\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_{Br} = (1+2\nu)\frac{\Delta L}{L}. \qquad \left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_{Br} = C(1-2\nu)\frac{\Delta L}{L}.$$

Résistance électrique :

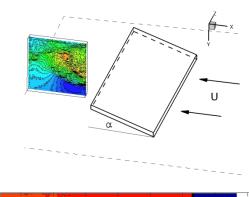
$$R = R_0 \left( 1 - \frac{x}{L_0} \right)^K.$$

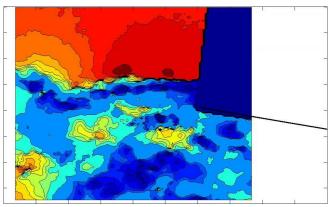


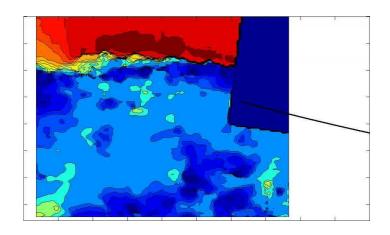




### Caractérisation expérimentale en PIV



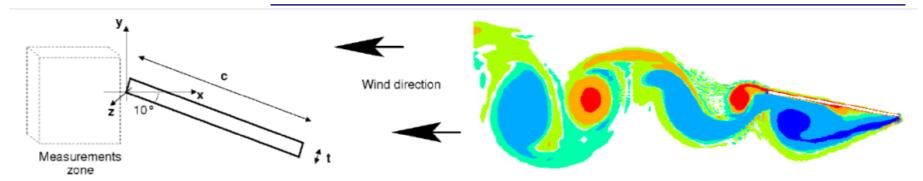




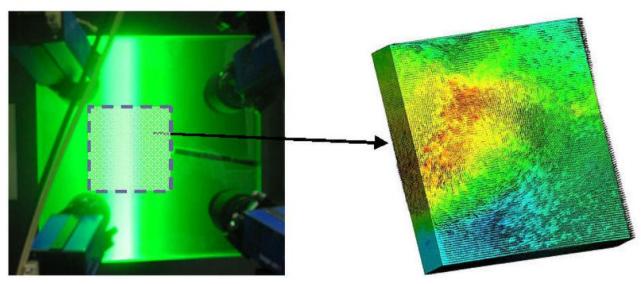
Champ de vitesses (Etude expérimentale par PIV – Thomas de Faramond & Enrico Deri) - veine de la soufflerie S4 de l'IMFT.



# Démonstrateur à moyenne échelle en soufflerie



- Mesure de vitesse 2D et 3D dans le sillage proche. Résolution temporelle
- PIV-Tomographique 3D, analyse POD, moyennes de phase.
- Etude du sillage en configuration dynamique.
- Cas de validation statique.
- Organized Eddy Simulations
- Re=200 000





# Caractérisation expérimentale en Tomo-PIV

#### 3.1 Reynolds averaged quantities

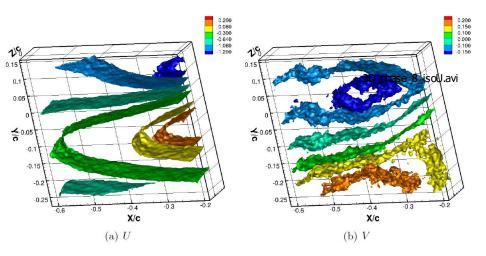
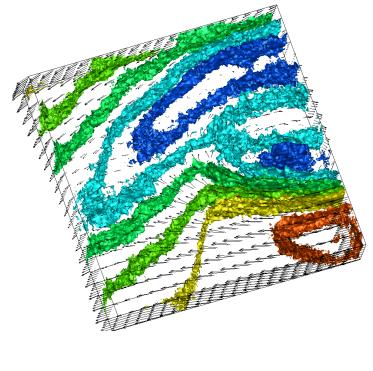
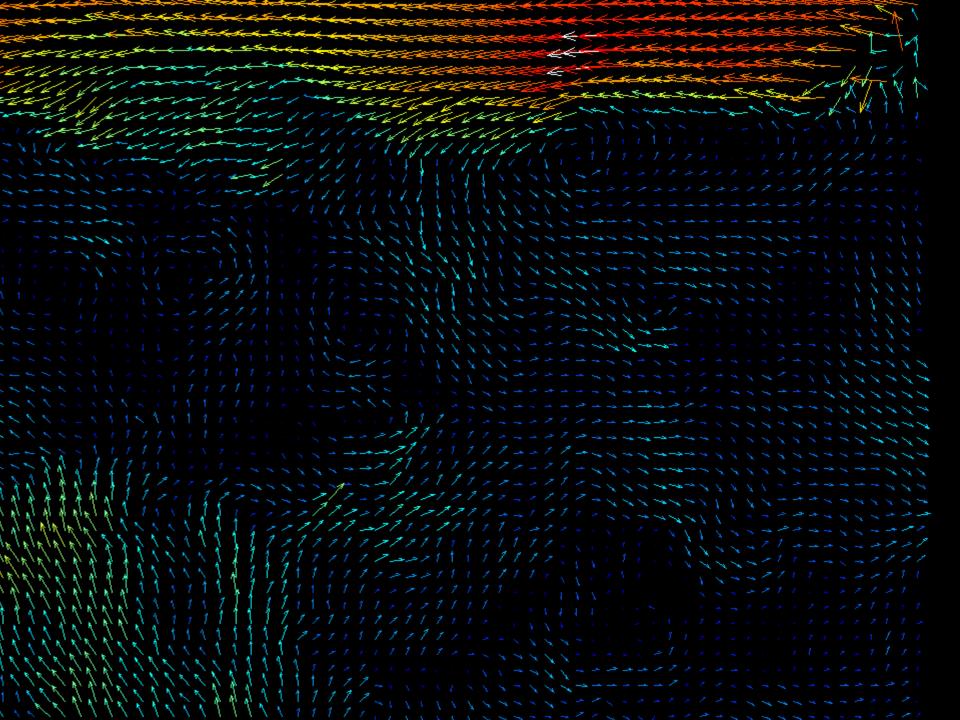


Figure 3: Reynolds averaged quantities measured by Tomo-PIV: streamwise U velocity and vertical V velocity.



S4 wind tunnel IMFT
Post-doc EMMAV E. Deri





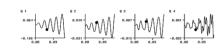
# MODELING CFDSM Computational Fluid Dynamics- Structural Mechanics

#### **Unsteady** aerodynamics and aeroelasticity: Challengies:

High-Reynolds number flows with thin shear-layer interfaces

Wall flows:Turbulence onset from near-wall

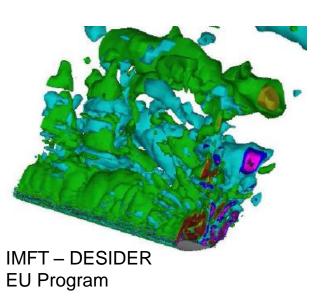
Near-wake modeling: Decisive for prediction ability of aerodynamic forces



- Nouveaux concepts de modélisation de la turbulence URANS - LES: cascade énergétique inverse – upscale turbulence modelling
- Prédiction améliorée d'un ordre de grandeur des coefficients aérodynamiques
- Couplage fort entre la structure et le fluide:
   résolution simultanée des équations CFD-SM :
- Modélisation d'ordre réduit pour des prédictions réalistes de modification de forme pour le design

Reynolds number: order of 10<sup>6</sup>-10<sup>7</sup>



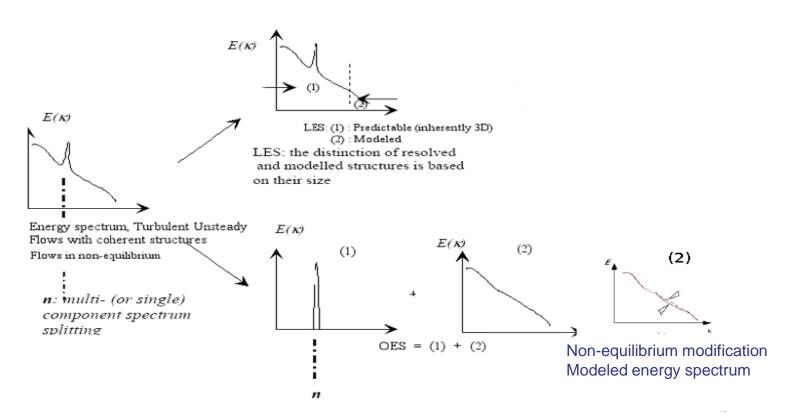




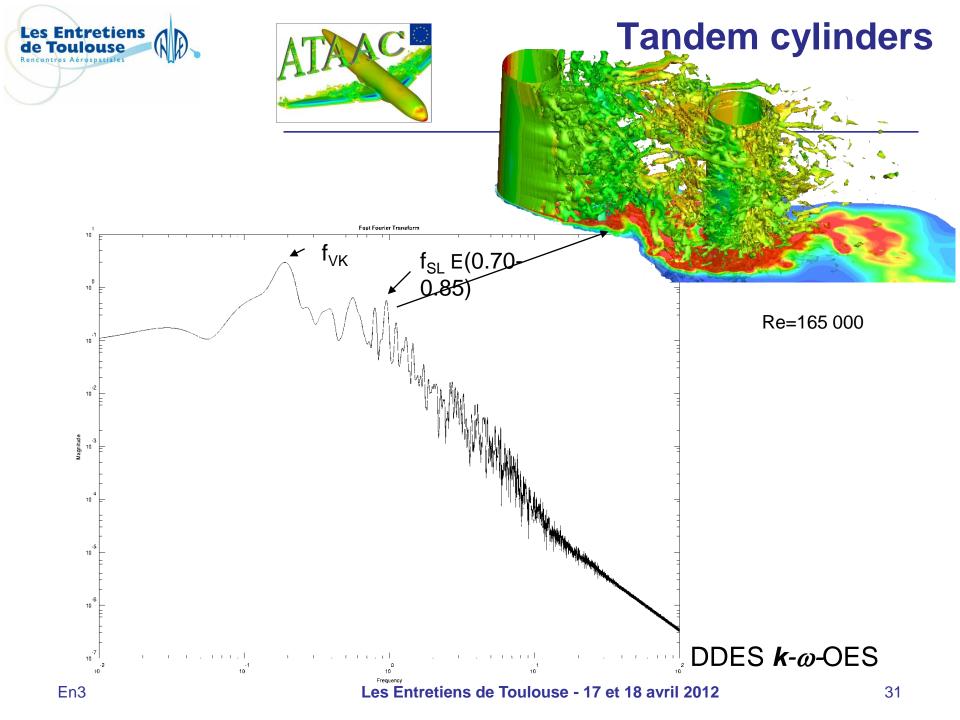
### **Turbulence modelling**

**Organized Eddy Simulation:** 

Energy spectrum splitting for distinction between the structures to be resolved from those to be modeled based on their organised coherent character



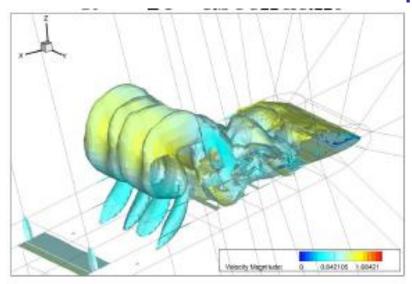
Hoarau, Braza, IUTAM Symp. Toulouse 2002 Braza, 2002, 2006, Notes on Num. Fluid Mech. vol. 81, vol. 94 Braza, Perrin, Hoarau, J. Fluids Struct. 2006 Bourguet, Braza, J. Fluids & Struct. 2008 Braza, Hunt, European Turb. Conf., 2011



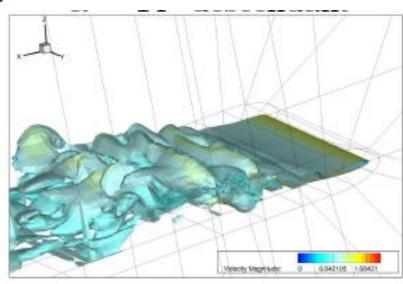


### 3D pitching wing flow a wing





$$\alpha = 14^{\circ}$$
 descendant



$$\alpha = 8^{\circ}$$
 descendant

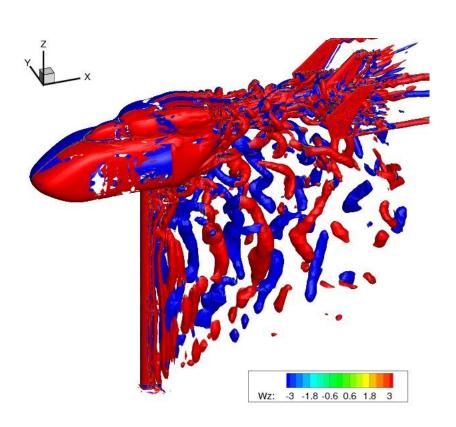
PhD G. Martinat – IMFT- équipe IFS

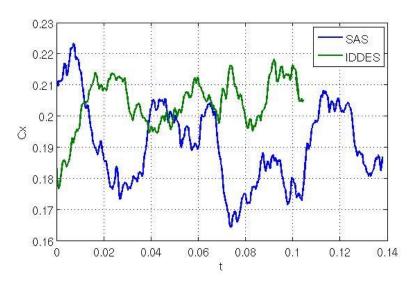




## **Helicopter EC145**

# Iso- $\lambda_2$ surfaces coloured by $\omega_z$ vorticity

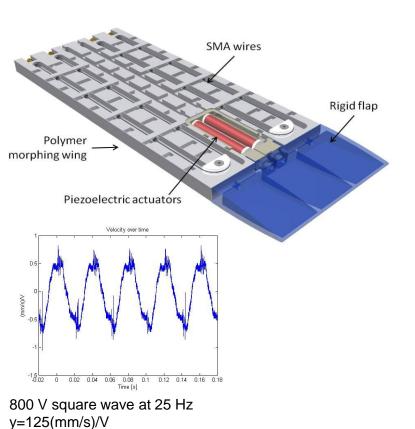


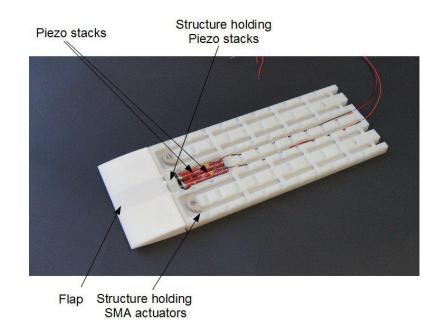






## **Prototype d'Hybridation AMF-PZT:**





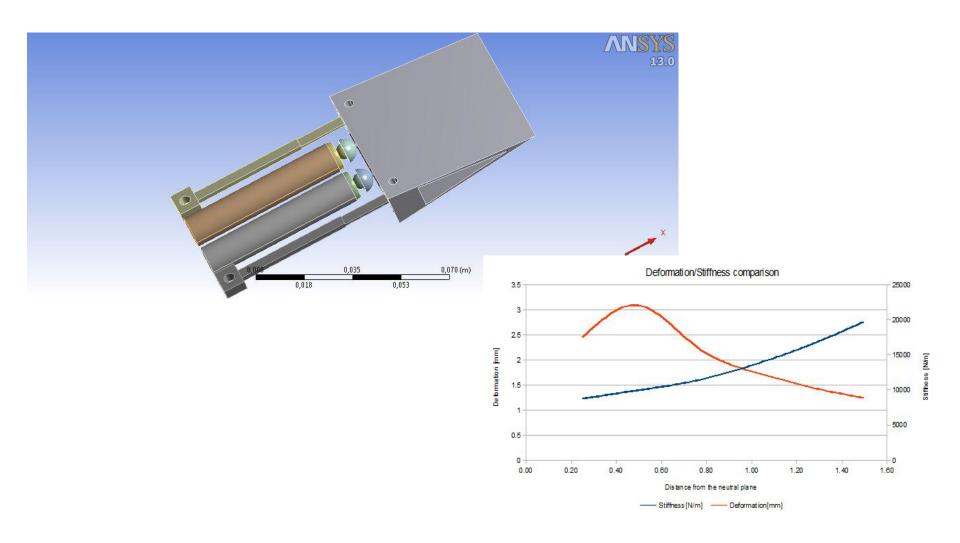
- 2 mm peak to peak deformation
- frequencies up to 25 Hz evaluated
- different signals



Intérêt de cette configuration : Les 2 céramiques agissent comme actionneur/Capteur

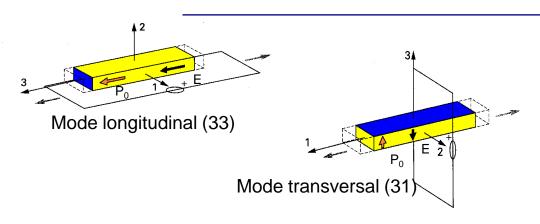


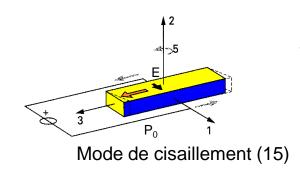
# Prototype d'Hybridation AMF-PZT: Compromis raideur amplitude





# Matériaux piézoélectriques Modes de couplage





**Coefficient de couplage électromécanique k** ⇒ la qualité de la conversion électromécanique dans PZT

$$k = \sqrt{\frac{W_{EM}^2}{W_E \cdot W_M}}$$

W<sub>EM</sub> – énergie électromécanique

W<sub>F</sub> – énergie électrique

W<sub>M</sub> – énergie mécanique

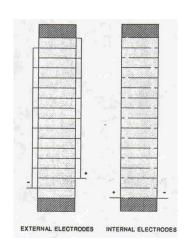
Valeurs numériques relatives du matériau P189				
k <sub>33</sub>	0,65			
k <sub>31</sub>	0,32			
k <sub>15</sub>	0,51			

⇒ Mode longitudinal le plus intéressant en terme de couplage



### Matériaux exploités en régime quasistatique

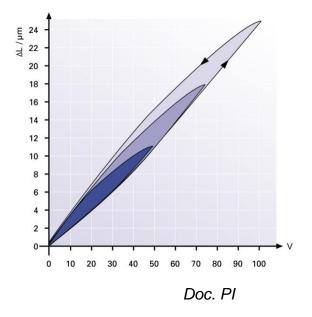
#### Céramiques PZT multicouches

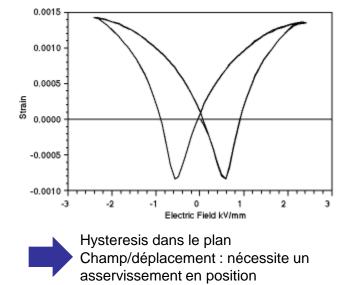


Barreau 11x11x30 mm:

- $-F_{\text{bloquée}} = 6000 \text{ N}$
- $-\Delta L = 30 \mu m$





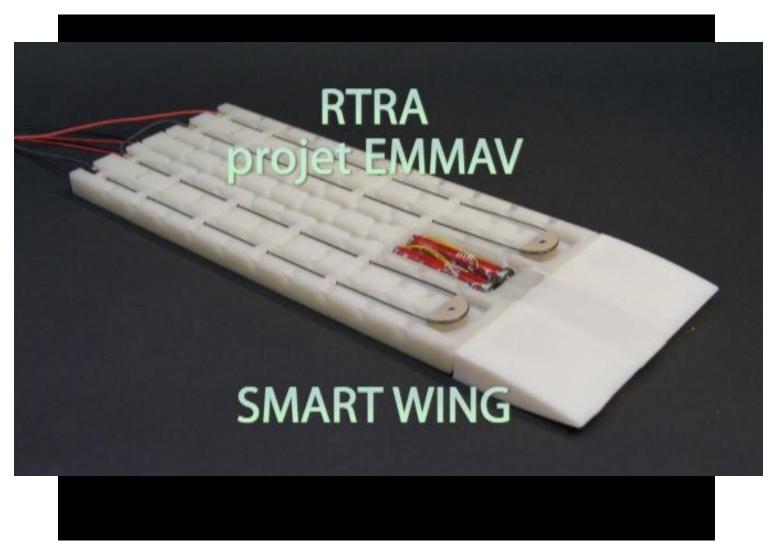




Capacité élevée (0,1 à 10 µF) Excitation à basse fréquence (de 100 à 1000 Hz)



### Prototype d'Hybridation AMF-PZT: Premières caractérisations

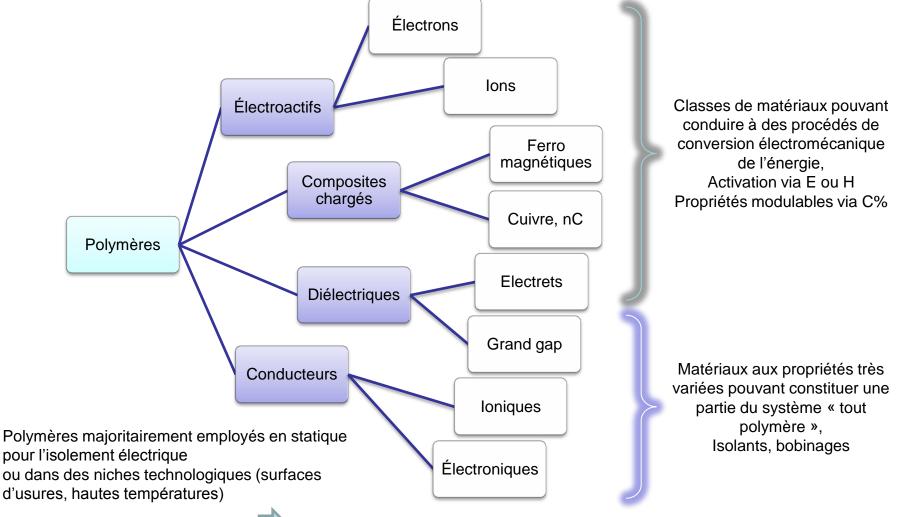




# Matériaux polymères



### Classification des polymères



Elargissement possible de leur emploi dans des modes plus dynamiques

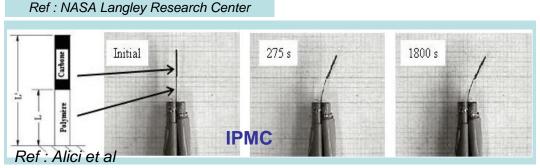


# Quelques réalisations avec des technologies polymères

# IPMC Pof t NASA Langley Pages of Contar

#### polymères ioniques

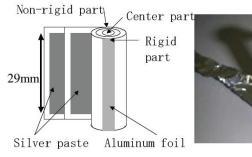
- > Temps de réaction long
- ➤ Nécessite un solvant
- ➤ Non réversible

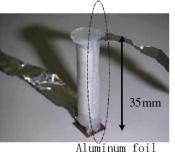


#### Gel polymère



#### Polymères électroniques

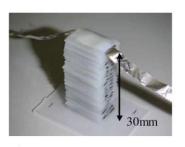




Measuring point

29mm

Aluminum foil Silver paste



Actionneur roulé

Actionneur multi-couches

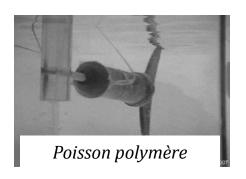


# Quelques réalisations avec des technologies polymères



#### Polymères électroniques

- ➤ Temps de réaction court (effet piézoélectrique)
- ➤ Pas de solvant
- > Fonction capteur

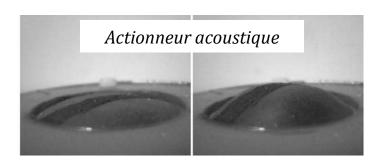


- "Design and Performance of an Electostrictive-polymer-film acoustic actuator" Journal of Sound and Vibration (1998)
- " Dynamic characteristics of High field Electro-active silicone and Acrylic elastomer Actuator devices" 2006, Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena.
- " Dielectric Elastomers as Electromechanical Transducers Fundamentals\_ Materials\_ Devices\_ Models and Applications of an Emerging Electroactive Polymer Technology"



#### Polymères diélectriques

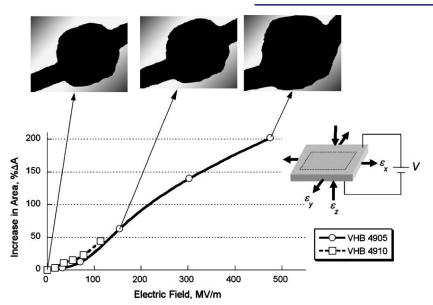
- ➤ Temps de réaction court (effet électrostatique)
- ➤ Pas de solvant
- ➤ Champ électrique appliqué élevé (100MV/m)
- ➤ Non réversible



Electromechanical coupling in dielectric elastomer actuators Michael Wissler a,b,\*, Edoardo Mazzab,c Sensors and Actuators A 138 (2007) 384–393



# Perspectives des technologies polymères



Application of Polypyrrole Actuators:
Feasibility of Variable Camber Foils
John D. W. Madden, Member, IEEE, Bryan Schmid, Martin Hechinger,
Serge R. Lafontaine, Peter
IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING, VOL. 29, NO. 3, JULY
2004

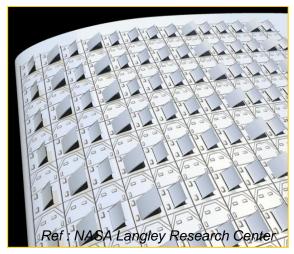
Influence of frequency and prestrain on the mechanical efficiency of dielectric electroactive polymer actuators
R. Palakodeti a, M.R. Kessler b,□Materials Letters 60 (2006) 3437–3440



Actionnement polymère au stade de la faisabilité avec caractérisation expérimentale de prototypes.



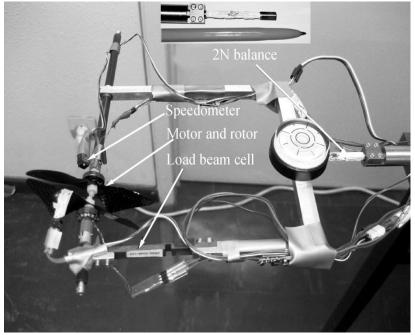
Capteur exploitable
Actionneur pour
microdrones ou pour
applications
biomimétiques

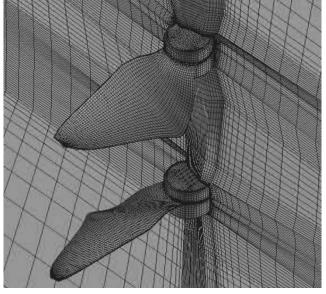




# Nanorotors coaxiaux: caractérisation et optimisation









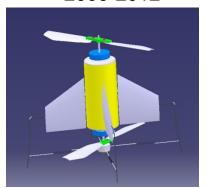
- Montage expérimental sur nano-balance de précision
- Calcul Navier-Stokes par méthode MRF





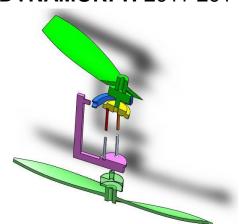
# Vers un démonstrateur de drone électroactivé

Concept 1 morphing gouverne **EMMAV** 2009-2012



Concept 2 commande têtes de rotors par muscles artificiels:

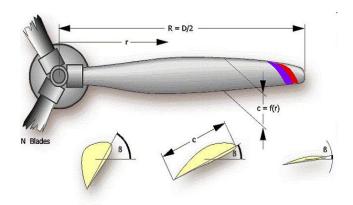
**DYNAMORPH** 2011-2014

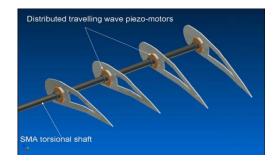


Concept 3

commande par pales électroactives

**DYNAMORPH** 





#### **General concept SMARTWING/DYNAMORPH**

- Hybridation concept: Distributed small piezoactuators and Shape Memory Alloys
- Low actuation cost thanks to: capacity of vibratory energy recuperation and restitution



# Matériaux polymères : Capteurs

# Application des polymères à la caractérisation dynamique d'un écoulement

Caractérisation d'un capteur de pression :

Vibration d'une membrane circulaire :



Influence des modes de vibration sur le signal électrique :



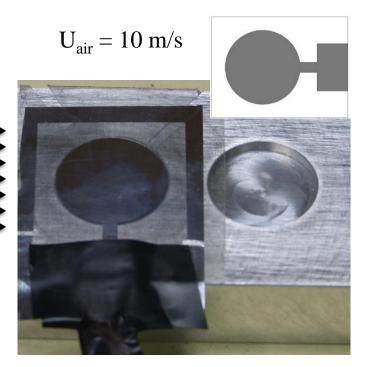
Amplitude maximale fixée à 1mm (profondeur de la cavité)

Réalisation d'un modèle du capteur :

Modèle premier ordre reliant la tension sortie capteur à la force exercée sur la membrane

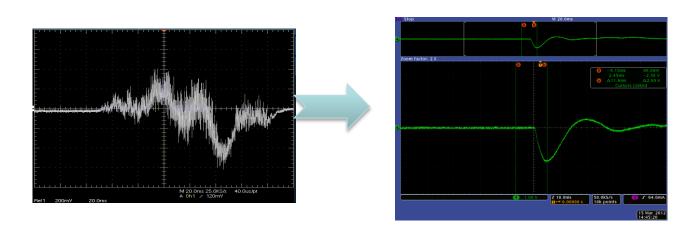
- Fonctionnement sur cavité de profondeur limitée pour ne pas perturber l'écoulement (1mm)
- Métallisation « au droit » de la cavité
- Contacts polymère/circuit « délicats »

Test sur un écoulement aéro :

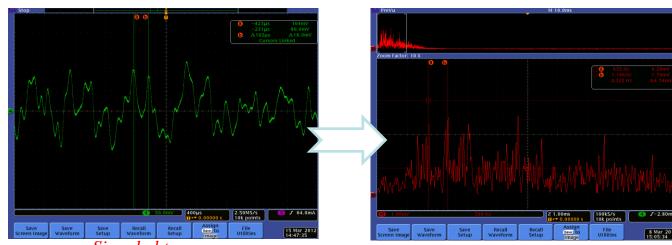




### Validation de la fonction capteur



Amélioration de la détection sur un impact ponctuel centré -en amplitude -en fréquentiel



Mise en évidence d'une :

- relation entre la vitesse de l'écoulement et l'amplitude du signal,
- -détection de fréquences caractéristiques à partir de 800Hz

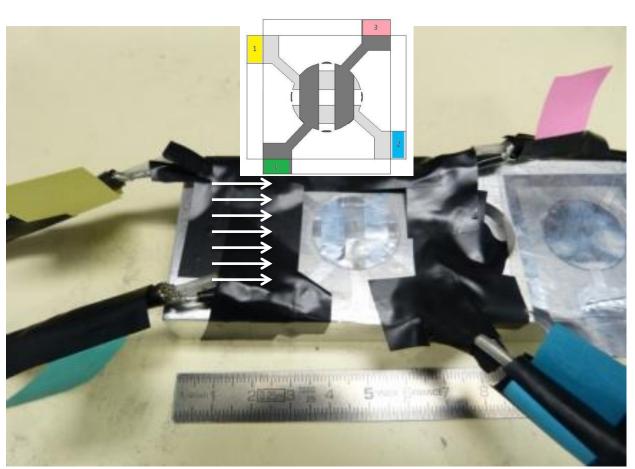
Signal obtenu sous écoulement d'air

En3

FFT du signal obtenu



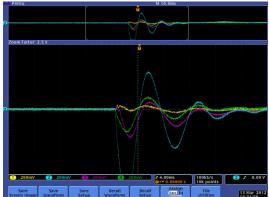
# Modification capteur pour sélectivité spatiale





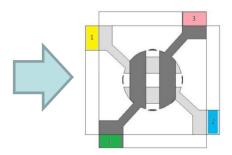
Impact centré sur la membrane

Impact centré sur la bande bleu





### Cas test vitesse de fluide de 10 m/s



#### Mise en évidence d'une :

- différence d'amplitude sur les voies transverses à l'écoulement,
- différence de phase entre ces mêmes voies.



- Mise en évidence de la nature et de la localisation des turbulences
- Rétroaction pour un contrôle à différentes échelles



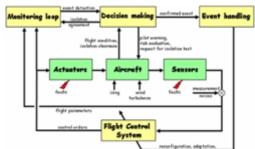
## Partenariat Control Design: ONERA



# Onera / Systems Control & Flight Dynamics Dpt.

- Automatic control
- Controller Design & Flight Control

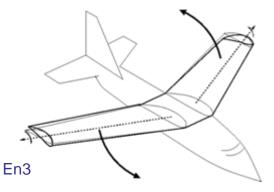




- Methods & Tools for Control Laws & Control Architecture
- Morphing aircraft (AVISAC project)
- IMMUNE Intelligent Monitoring & Autoreconfiguration



DEVIS Demonstrator of Innovative Actuators Wing









### **ASPECTS NOVATEURS**

S'appuyant sur la compréhension des enjeux acquise au cours du EMMAV: **nécessité** de diversifier les types d'actuations:

•mini-piezoactuateurs PZT : haute fréquence de morphing -régime dynamique

•polymères électroactivés IPMC : perspectives technologiques inédites

vers la biomimétique: augmentation des performances

réduction du bruit aérodynamique

•couplage fort fluide - structure :

•actuations rapides de petite amplitude à des actuations lentes de forte

amplitude : verrou physique à l'accession à des gains de performances



### **ASPECTS NOVATEURS -suite**

•couplage fort fluide - structure :

•actuations rapides de petite amplitude à des actuations lentes de forte

amplitude : verrou physique à l'accession à des gains de performances

Système d'ailerons de bord de fuite complexes: biomimétique

Augmentation de la portance en régime de faible vitesse







