

Journée Lauric Garbuio Mercredi 11 octobre 2023

# Réduction des forces et Augmentation des performances aérodynamiques à l'aide d'actionneurs électroactifs

par

**Lauric Garbuio, Marianna Braza\* et Jean-François Rouchon\*\***

**\*IMFT - UMR5502 CNRS-INPT-UT3 et \*\*LAPLACE - UMR 5213 CNRS-INPT-UT3**

Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse - Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie



# Interactions vibrations/frottement

## Concept de lubrification électroactive

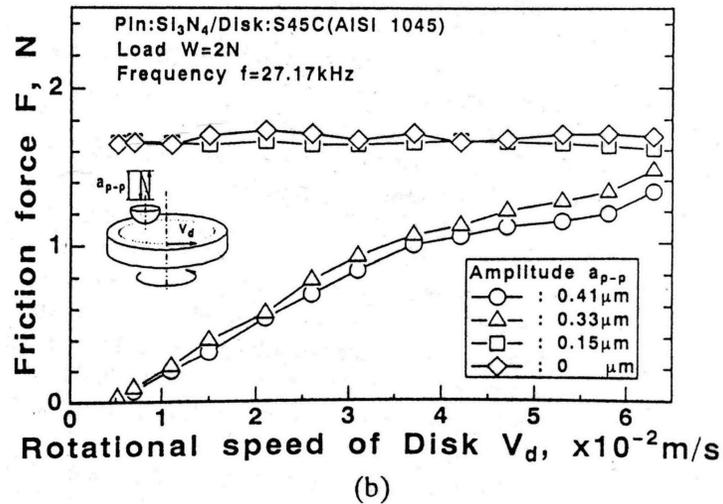
Thèse Lauric Garbuio et Céline Cenac-Morthe

- Modéliser pour comprendre et valider expérimentalement
- Diminuer les pertes par frottement
- Contrôler électriquement les forces de frottement
- Recherche de nouvelles fonctionnalités

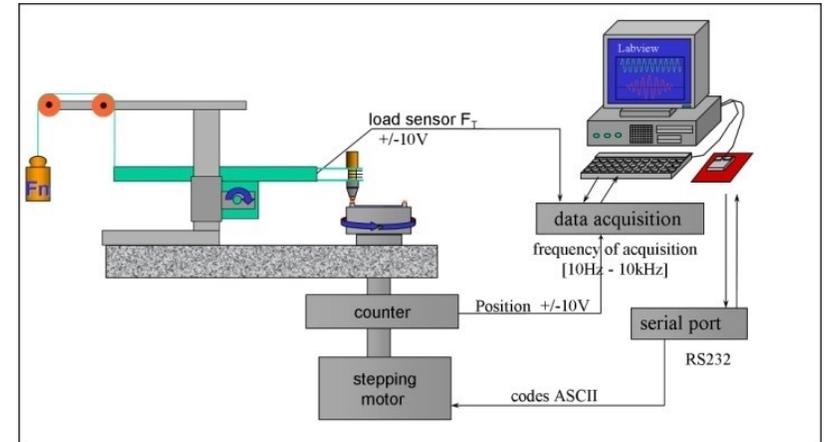
# Interactions vibrations/frottement

## Mise en évidence du phénomène

- Applications coulage des aciers
- Usinage
- Etude des moteurs piézoélectriques : fréquences élevées, amplitudes faibles



K. Adachi, K. Kato et Y. Sasatani, *Wear*, 1996.



J.F. Rouchon, S. Crespin, Ph. Kapsa, STF SIRPE, 2000

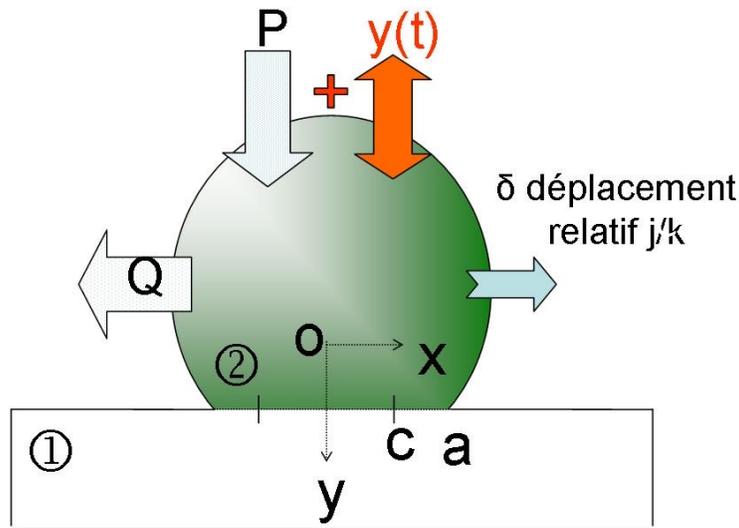
Bonne estimation de l'effort dynamique  
Bonne estimation du taux de contact

# Interactions vibrations/frottement - Modélisation

Modélisation du phénomène – vibrations produites au contact  
(thèse de L. Garbuio)

Différentes sollicitations ont été étudiées :

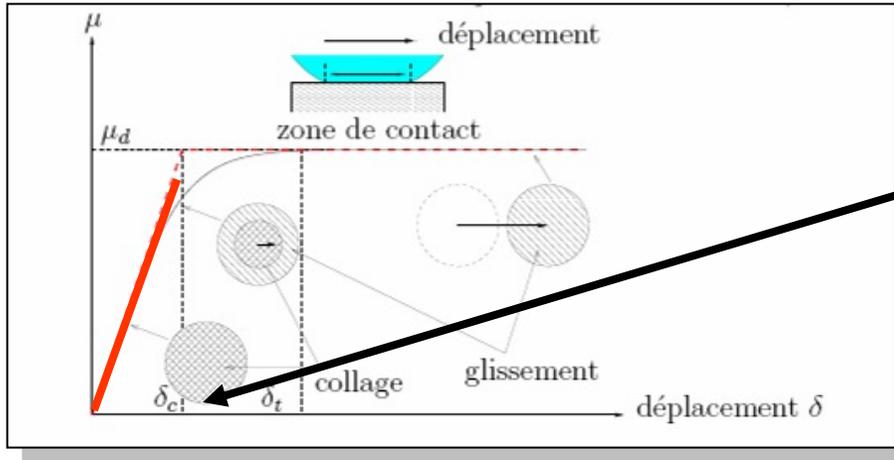
- dans le plan du contact (augmentation de la longueur cinématique qui occasionne de l'usure)
- normale au contact



Choix d'une géométrie idéalisée

# Interactions vibrations/frottement - Modélisation

Glissement partiel/glissement total



Déplacement critique

$$\delta_c(t) = \frac{2 \cdot \mu_d \cdot K_1}{3} \sqrt[3]{\frac{4E * F_d^2(t)}{3R}}$$

Effort dynamique

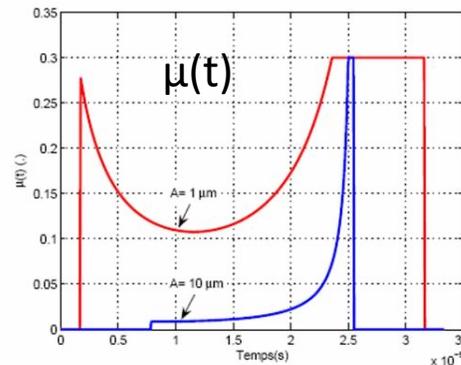
$$F_d = K \cdot \left[ \left( \frac{P}{K} \right)^{\frac{2}{3}} + Z \cdot \sin(\omega \cdot t) \right]^{\frac{3}{2}}$$

Une séparation du contact possible si

$$F_d \leq 0$$

Effort tang. instantané

$$F_T(t) = \mu(t) \cdot F_d(t)$$



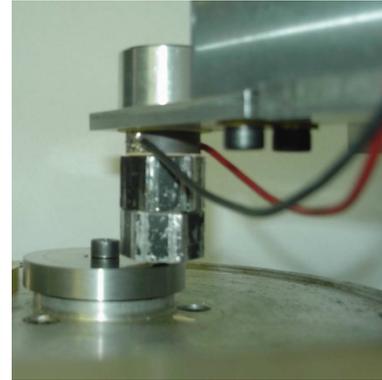
Effort tang. moyen

$$F_T = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T F_T(t) \cdot dt$$

Coefficient de frottement apparent =  $F_T/F_N$

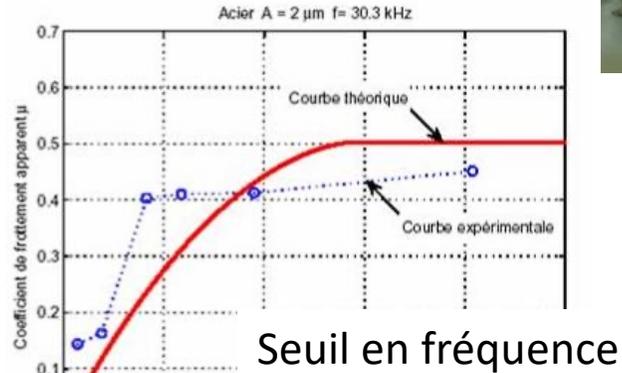
# Interactions vibrations/frottement – Approche expérimentale

Tribomètre dédié



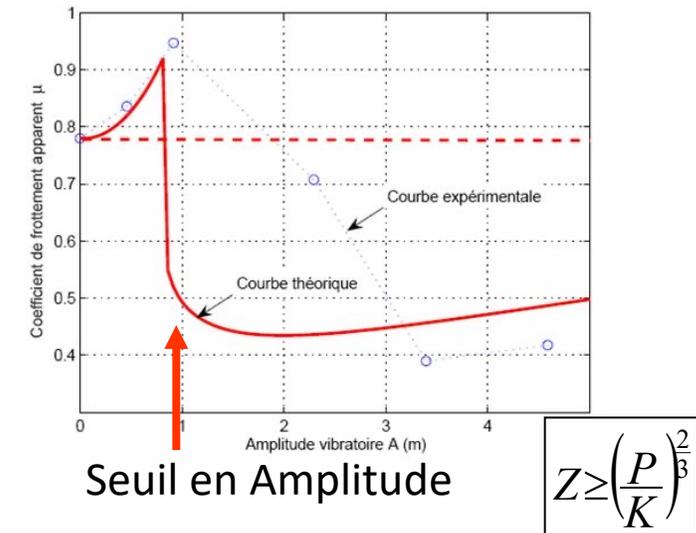
Actionneur de Langevin

Adéquation vitesse/fréquence

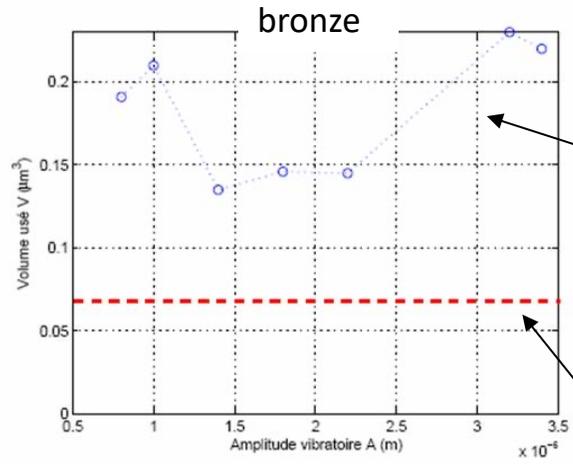


$$f > v \cdot \frac{3}{4 \cdot \pi \cdot \mu_d \cdot K_1} \sqrt[3]{\frac{3R}{4E * K^2}} \frac{1}{\sqrt{A^2 - A_0^2}}$$

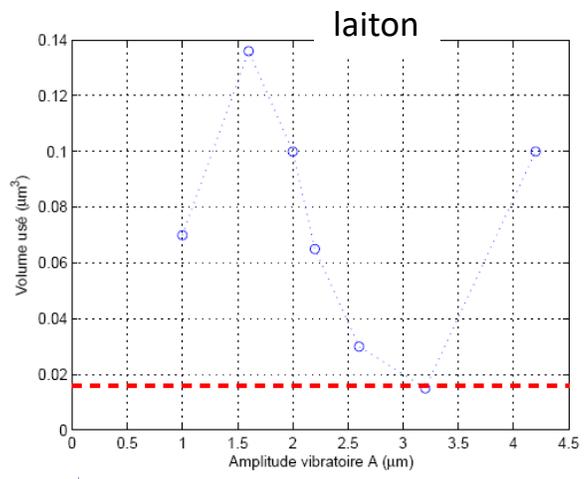
Adéquation amplitude/raideur



- Un comportement asymptotique pour les grandes vitesses
- Un seuil en amplitude
- Une contribution de l'effort dynamique importante si l'amplitude augmente
- Une diminution sensible du coefficient de frottement apparent

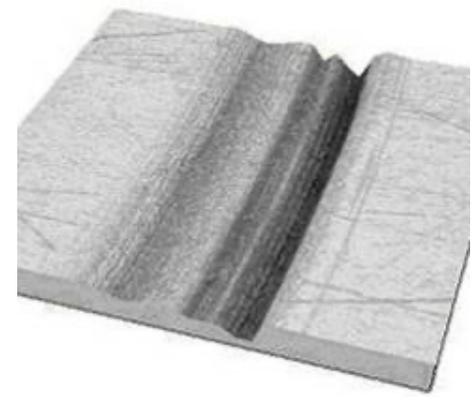


Volume usé avec vibrations

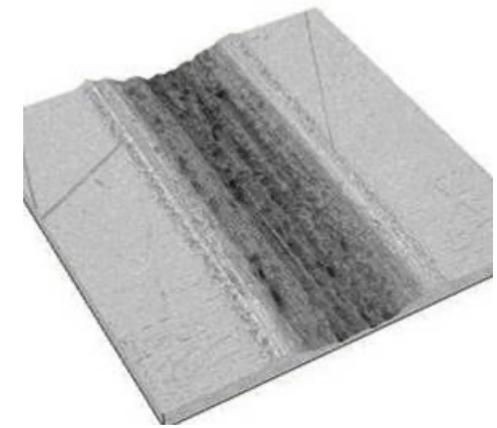


Volume usé sans vibrations

Usure abrasive



à adhésive



Taux d'usures minimum pour le seuil d'amplitude

# Les applications de la lubrification électroactive

## Réduction des pertes par frottement

### Collaboration (ASIATECH – LEEI)

Application : Moteur a combustion interne de Formule 1

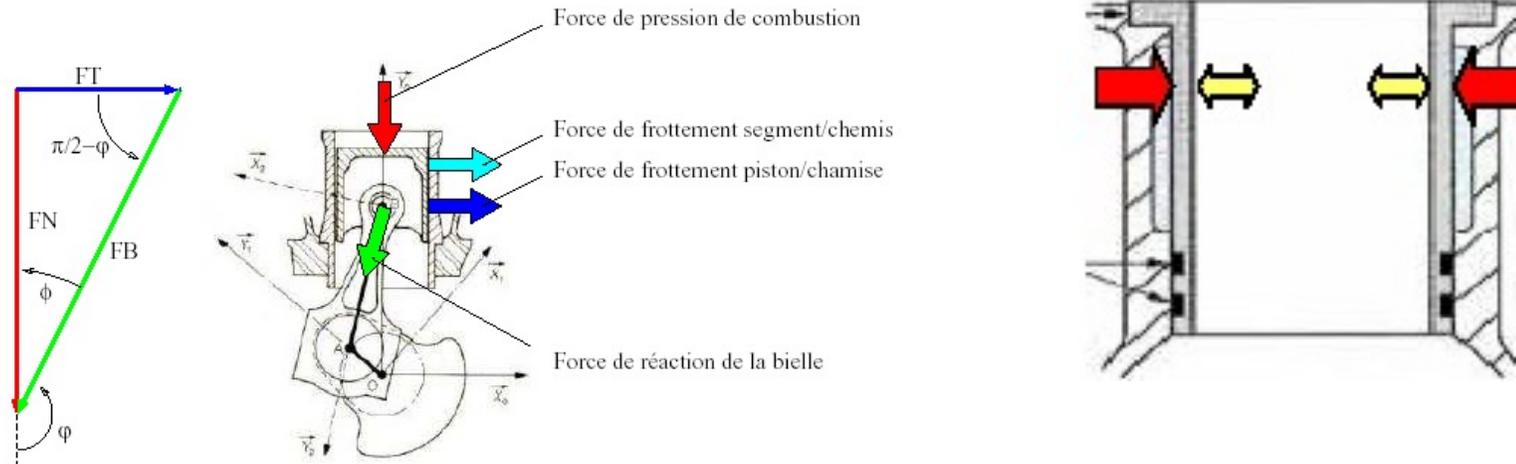
Objectif : réduction des frottements dans le contact piston chemise

Thèse de Lauric Garbuio

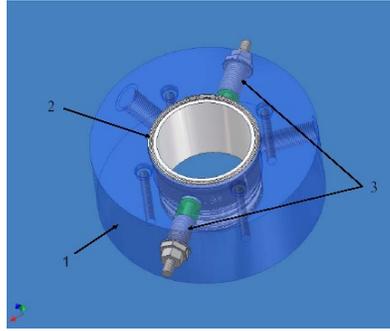
Orientation choisie : concept de lubrification électroactive

Géométrie de contact propice à la mise en œuvre de ce concept,

une température de fonctionnement en adéquation avec les limites associées aux matériaux piézoélectriques

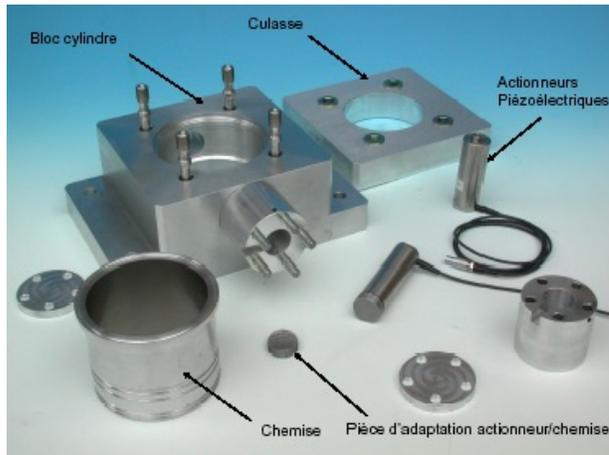
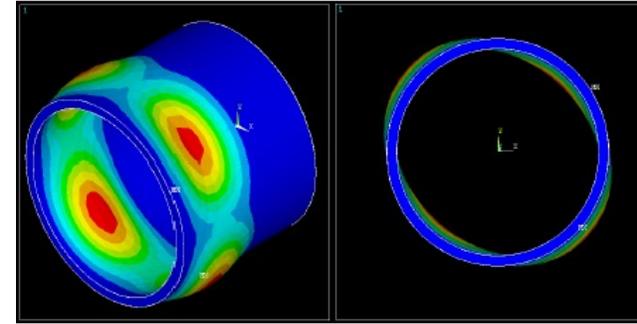


Activation de l'interface par des actionneurs positionnés dans le plan de bielle

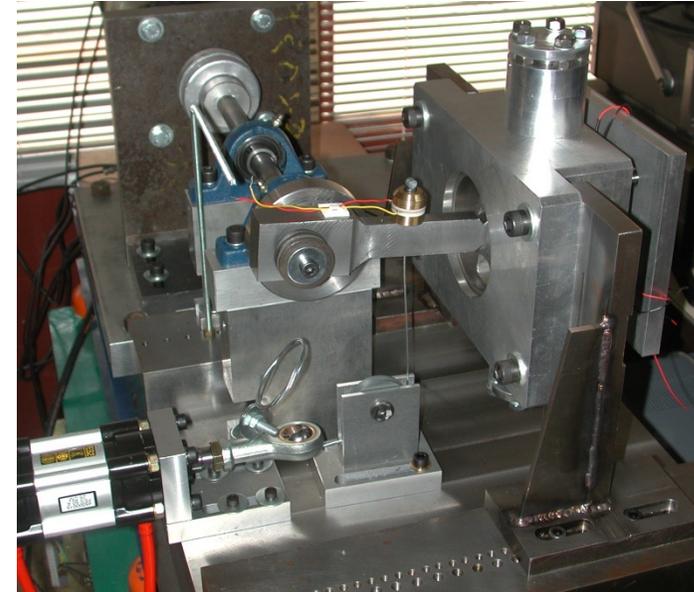


Positionnement des actionneurs

Excitation d'un mode propre de résonance de la chemise (23 kHz)

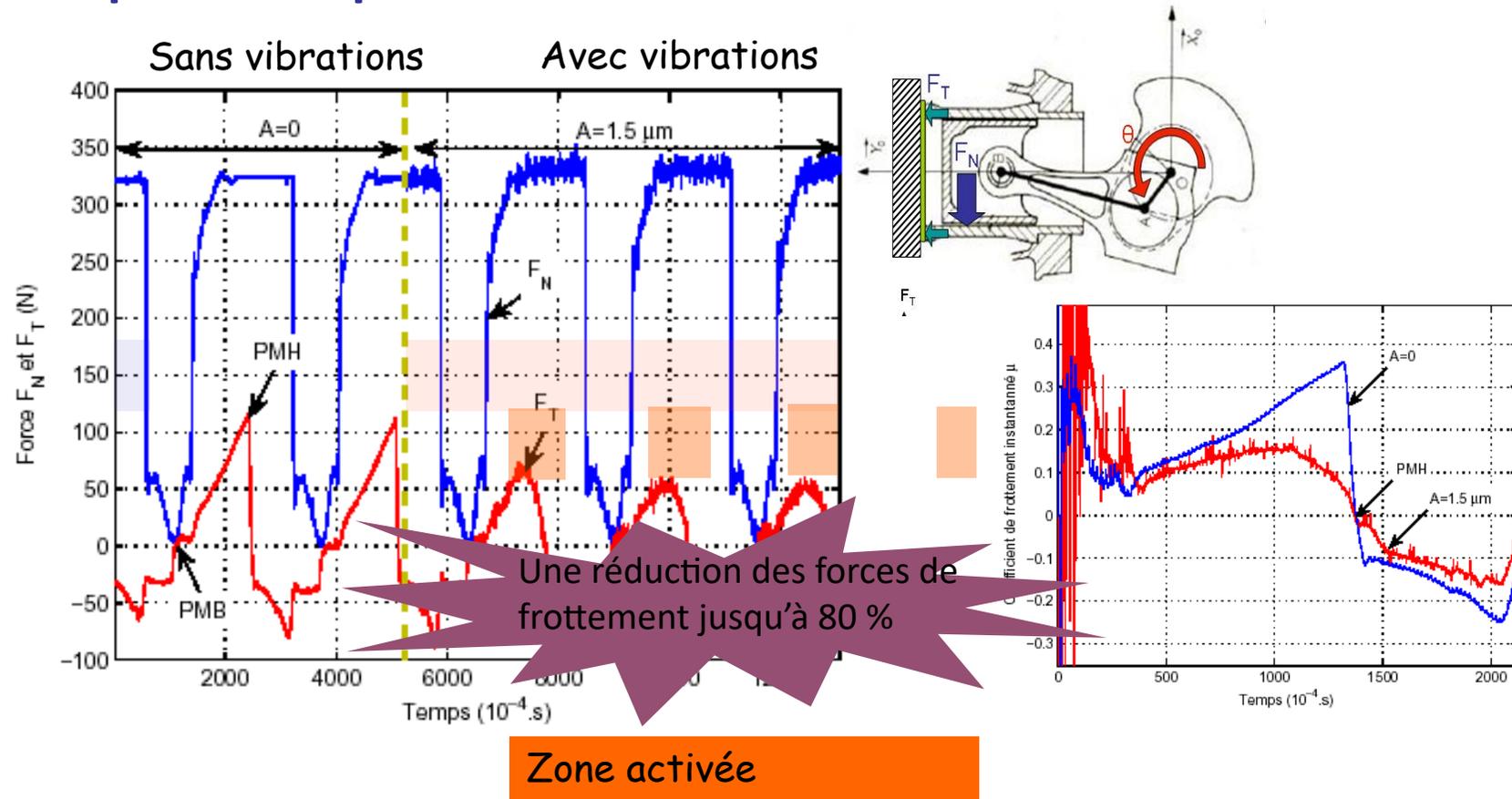


Pièces requises pour le montage expérimental



# Les applications de la lubrification électroactive

## Réduction des pertes par frottement



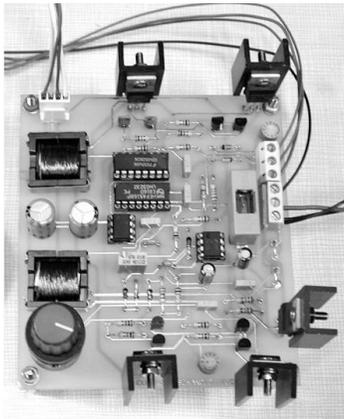
Une réduction effective du coefficient de frottement apparent est observée dans la zone activée  
Une réduction du stic/slip est également observée

# Les applications de la lubrification électroactive

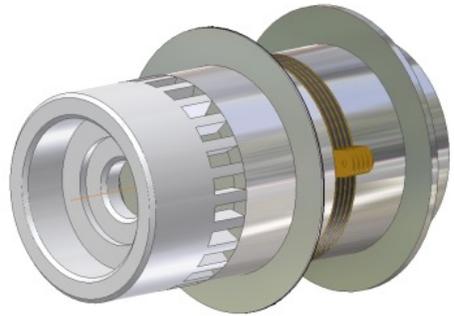
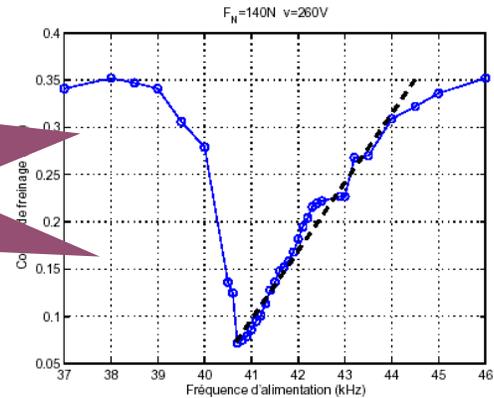
## Contrôle des pertes par frottement

Objectifs : moduler la force de frottement

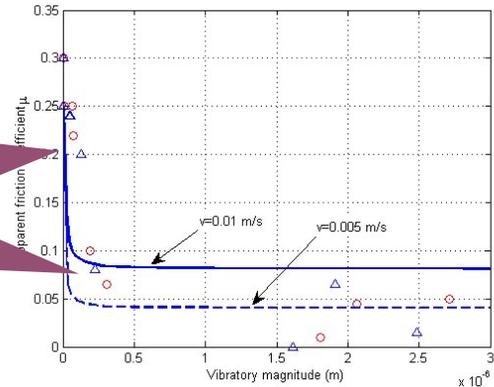
Applications : limiteurs de couple, butée électroactive, palier électroactif



Une évolution linéaire du couple de frottement avec la fréquence



Une réduction sensible des forces de frottement bien simulée théoriquement





# Design des ailes d'avion du futur bioinspirées au sein de projets Européens fédératifs coordonnés par Toulouse INP

par

**Marianna Braza\*** et **Jean-François Rouchon\*\***

\***IMFT** - UMR5502 CNRS-INPT-UT3 et \*\***LAPLACE** - UMR 5213 CNRS-INPT-UT3

Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse - Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie



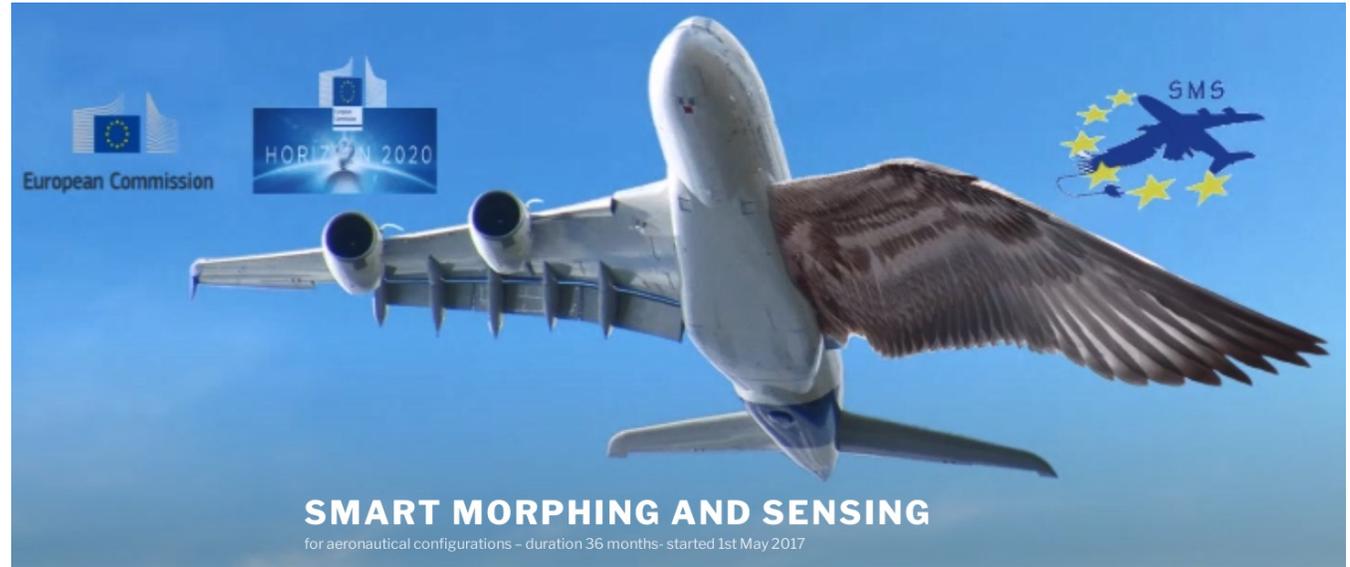
De l'avion de Clément Ader, « Eole » en 1890

vers de nouveaux designs des ailes du futur

Voir film dédié par le CNRS à notre thématique:

<https://lejournald.cnrs.fr/videos/the-wings-of-the-future>

Ader s'était procuré des [roussettes des Indes](#), gigantesques chauves-souris dépassant 1,10 mètre d'envergure. Il les avait observées planer dans une volière construite dans son jardin. C'est en s'inspirant de leurs ailes qu'il conçut l'Éole.



Des ailes d'avion du futur bioinspirées, comme celles de grands oiseaux prédateurs

Projet Européen SMS : « *Smart Morphing & Sensing for aeronautical configurations* »

[www.smartwing.org/SMS/EU](http://www.smartwing.org/SMS/EU)

<https://cordis.europa.eu/project/id/723402>

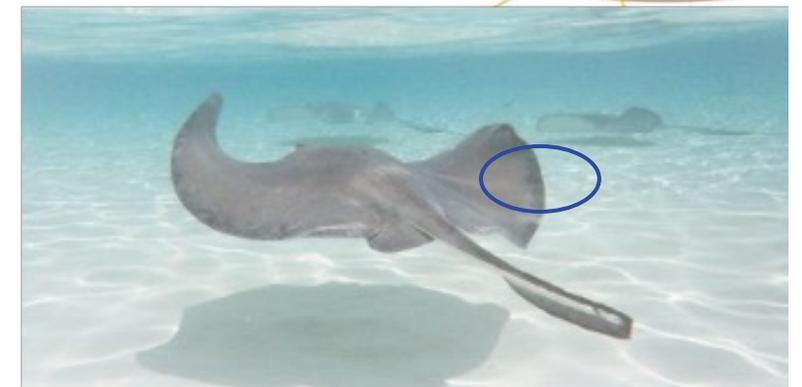
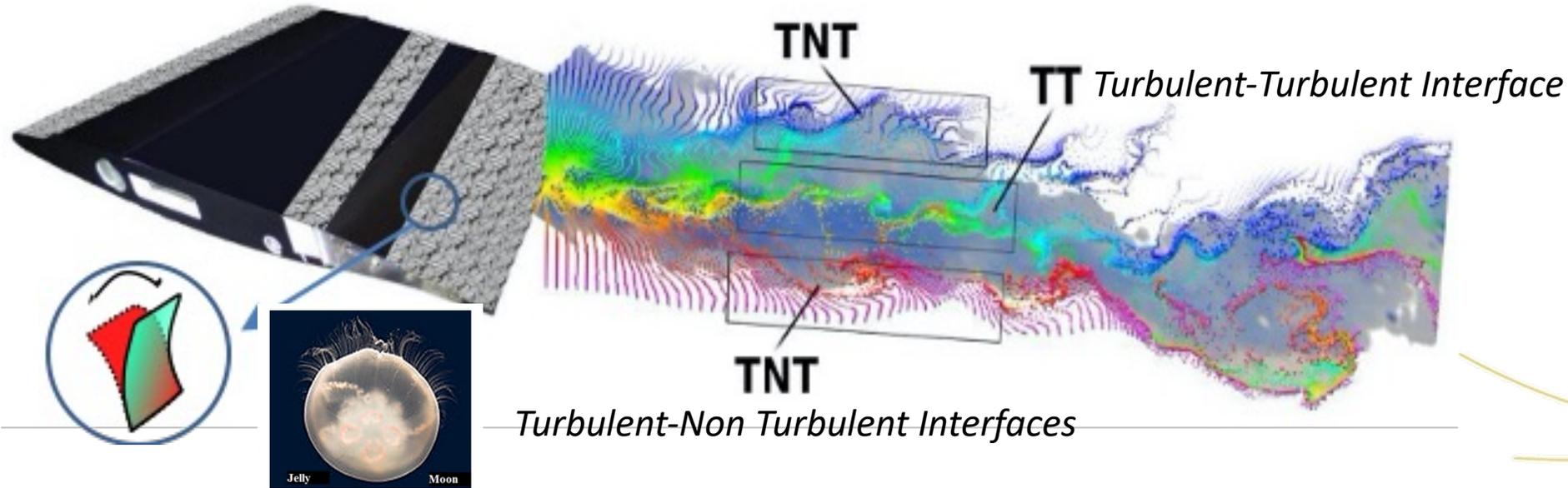


Et 9 partenaires Européens

HORIZON EUROPE CALL EIC Pathfinder 2023 - 2027

European Innovation Council **PROJECT BEALIVE**

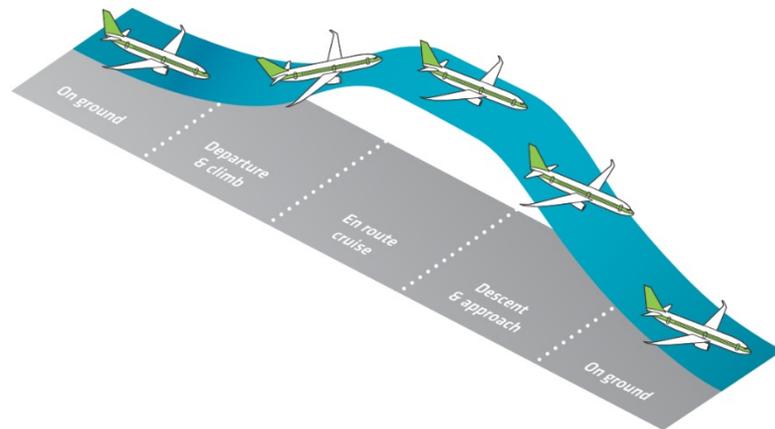
Biospired Electroactive Aeronautical LIVE skin



# VERS DES AILES DEFORMABLES et VIBRANTES : MORPHING ELECTROACTIF BIO-INSPIRE



Stages of flight



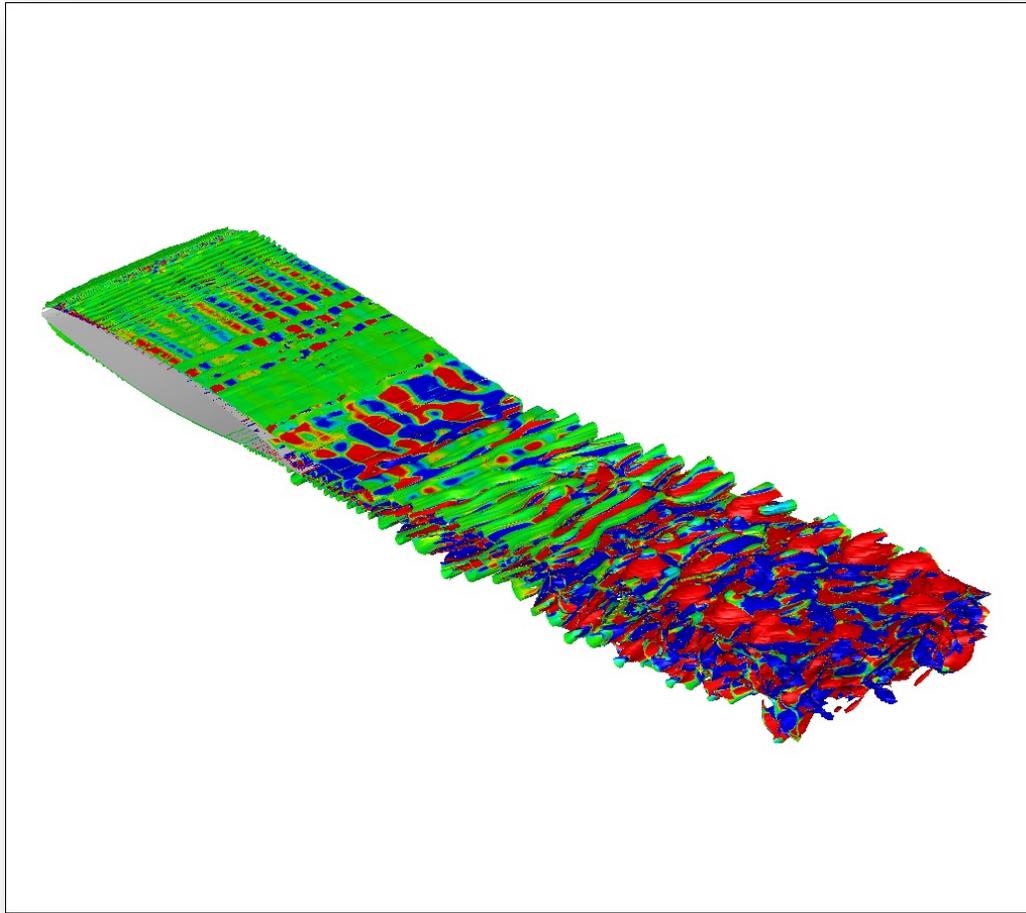
## Augmentation des performances aérodynamiques:

- Augmentation de la portance
- Réduction de la traînée
- Réduction du bruit



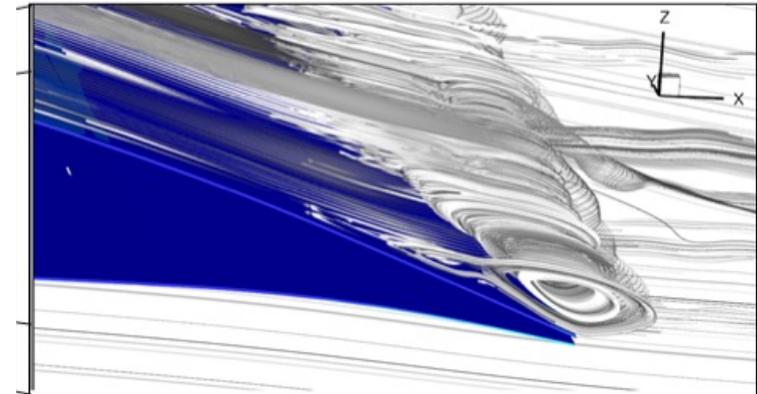
# Structure de la turbulence autour d'une aile d'avion A320 sans activations - conditions take-off à l'angle d'incidence de $10^\circ$

---



Vitesse amont de 21 m/sec

Correspond à un nombre de Reynolds de 1 Million



*Figure: Spanwise vorticity iso-surface coloured by streamwise vorticity.*



## Problématique:

Comment on peut implémenter différents actionnements à plusieurs échelles de longueur et de temps sur une aile d'avion comme exigé par la nature de la Turbulence?

Reduced Scale (RS) A320 prototype: chord of 70 cm, span: 70 cm

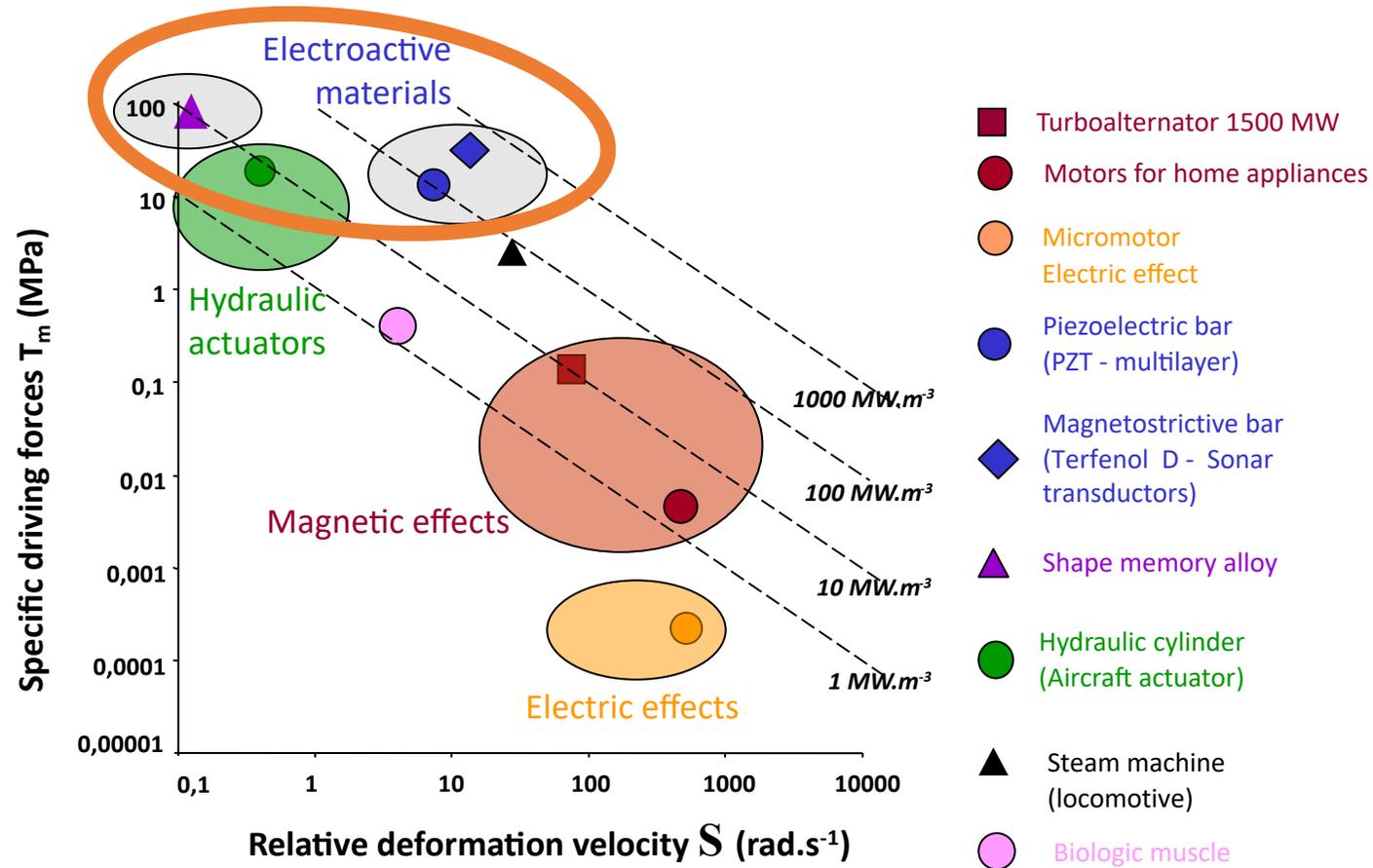
- Adaptation of embedded solutions with electroactive actuators in wind tunnel

Large Scale A320 prototype near full scale: chord of 2,4 m, span : 4m

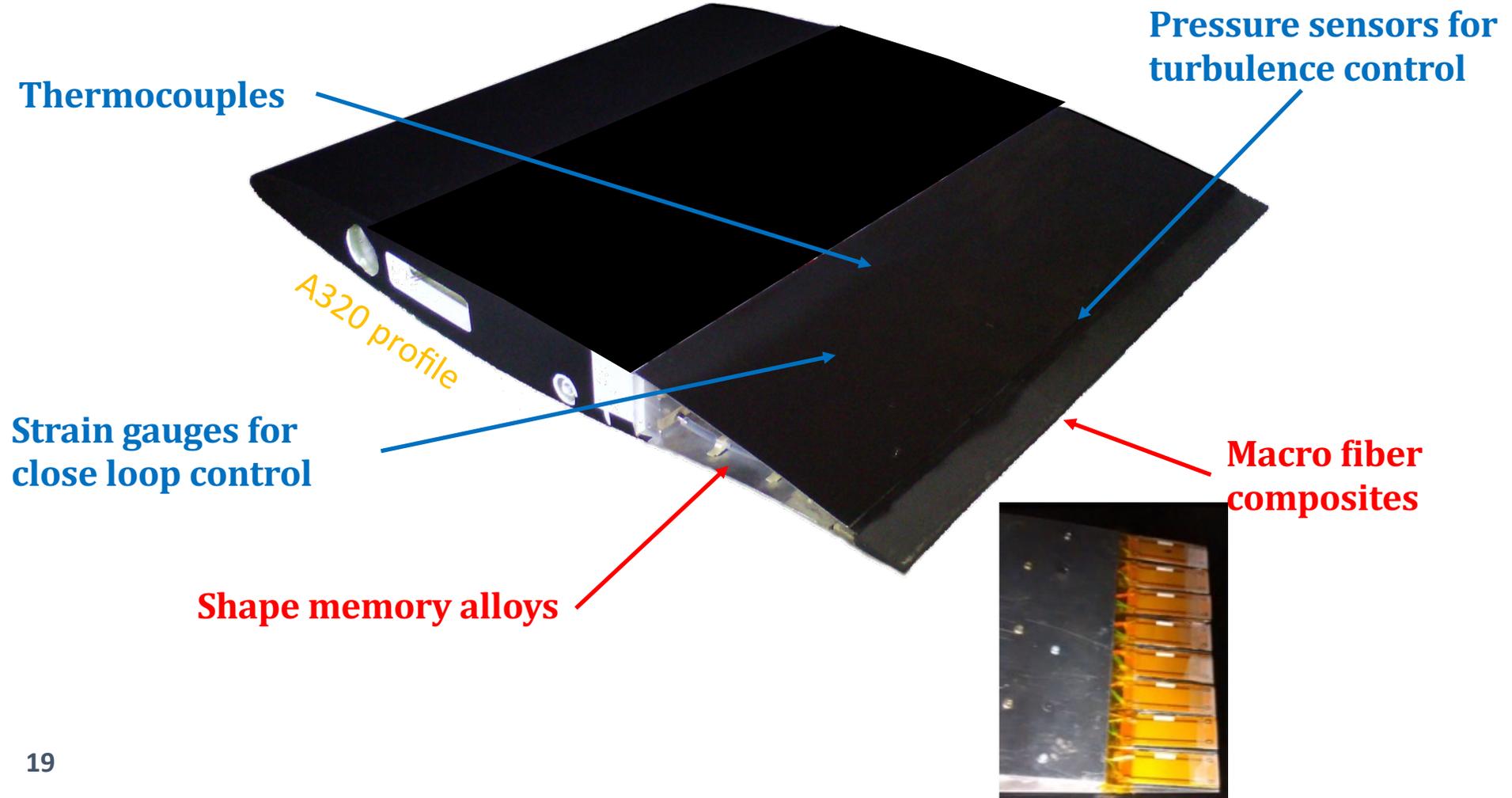
- Preuve de portage des concepts du morphing en échelle réelle

## Offre Technologique

### Comparison of different actuating technologies



## □ Mechatronics



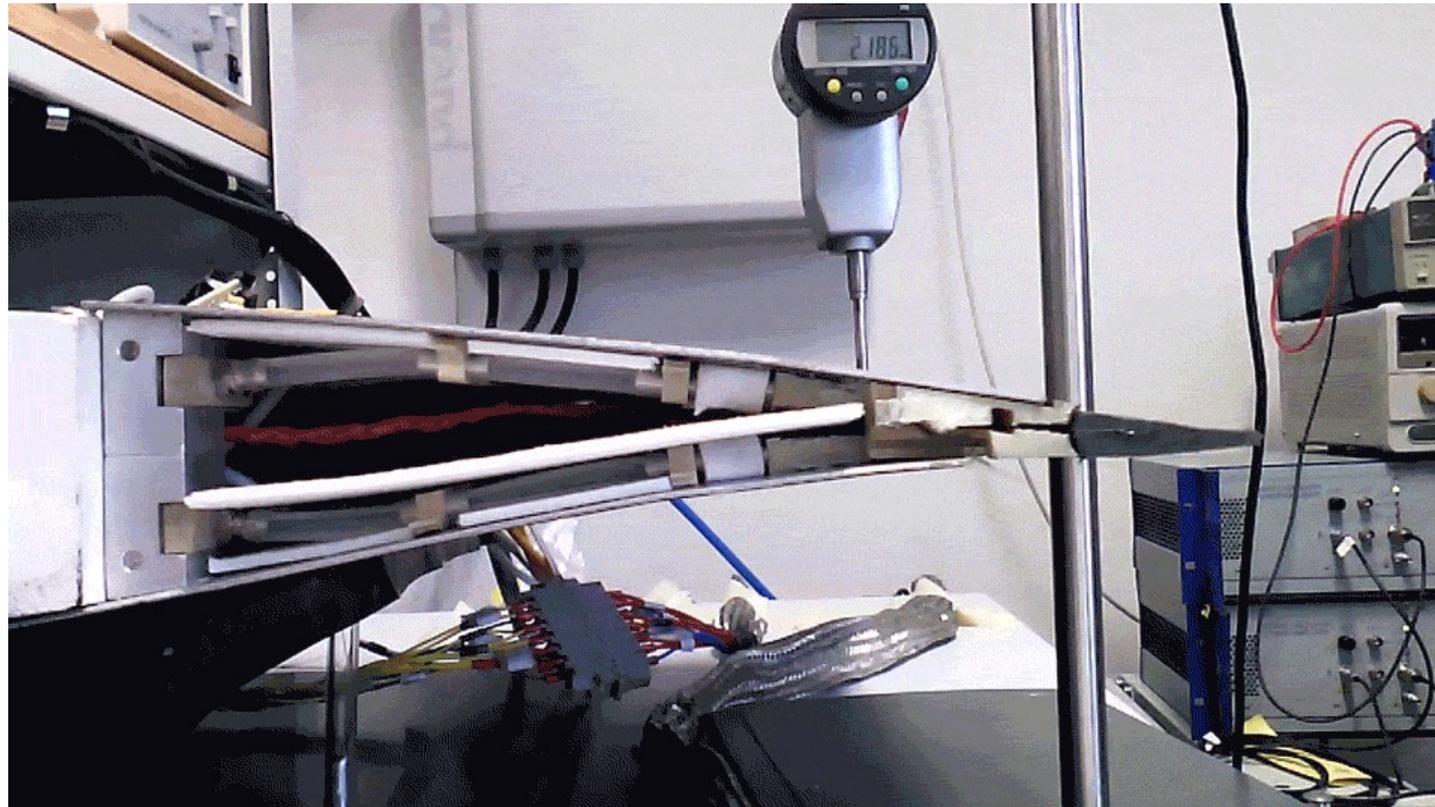
- Prototype électroactif d'une aile Airbus A320 en echelle réduite (corde de 70cm)

**Realization:**

*large amplitude – low frequency*

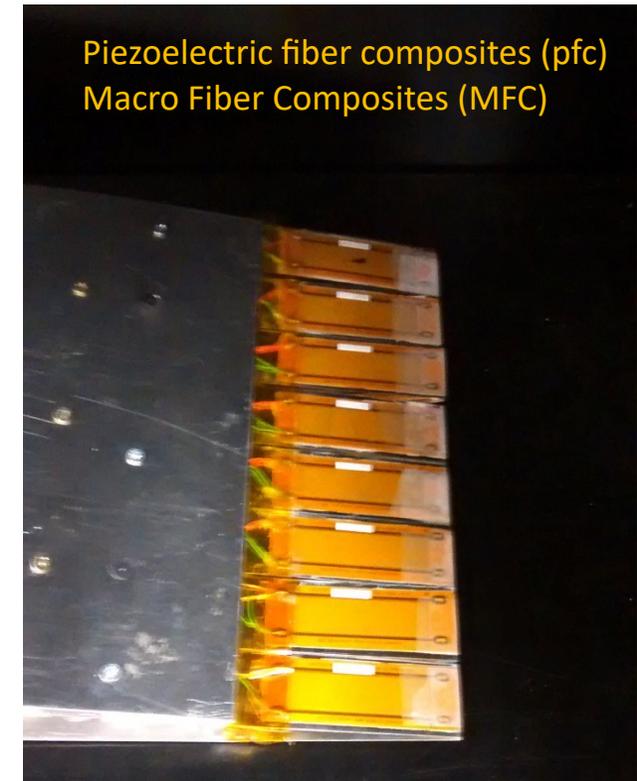
Actuated length 200mm

Tip displacement over than +/- 20mm (+/-10% of actuated length)

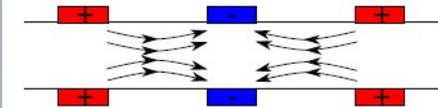


## ASSOCIATION DE PLUSIEURS FREQUENCES ET AMPLITUDES DE VIBRATIONS:

- 1) ALLIAGES A MÉMOIRE DE FORME - « Shape Memory Alloys » - SMA
- 2) ACTIVATION A PLUS HAUTE FREQUENCE à DE FAIBLES AMPLITUDES - Piezoactuators MFC et HYBRIDIZATION : SMA - MFC



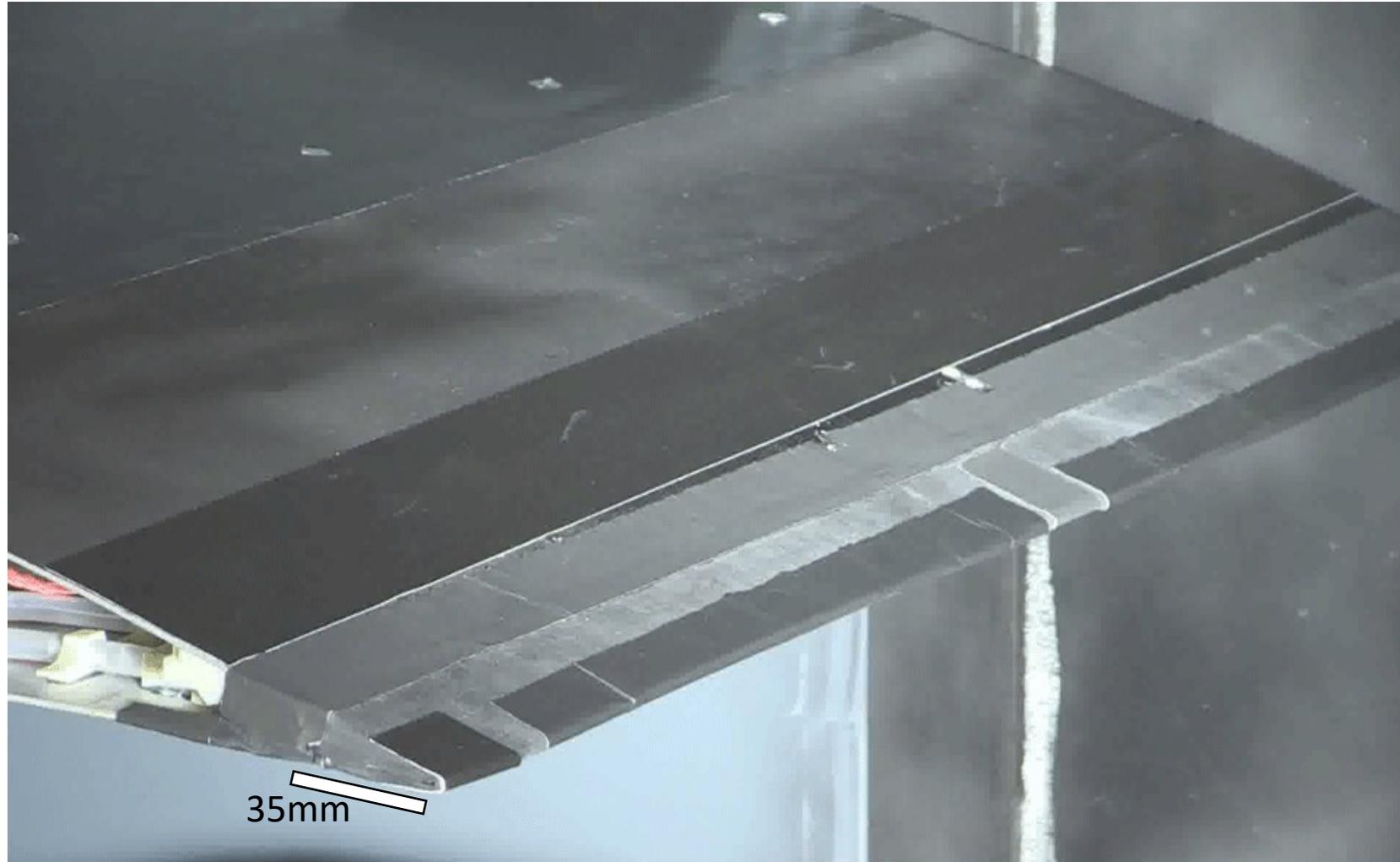
(a) Comercially available piezoelectric fiber composite



(b) Interdigitated electrodes (IDES)

Figure 1: Piezoelectric composites

ACTIVATION A PLUS HAUTE FREQUENCE DU BORD DE FUITE – A320  
*“Higher Frequency Vibrating Trailing Edge (HFVTE) “*

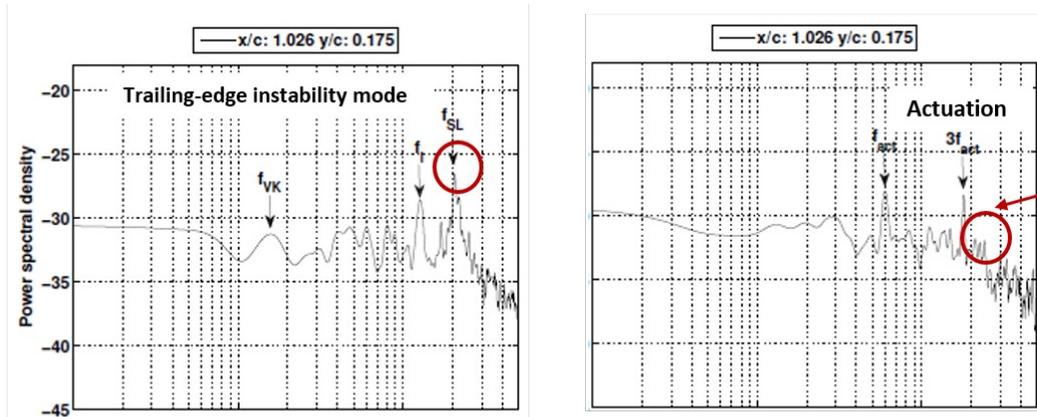


Comment on peut manipuler la turbulence pour créer un système interactif fluide-structure électroactive pour accroître les performances aérodynamiques.

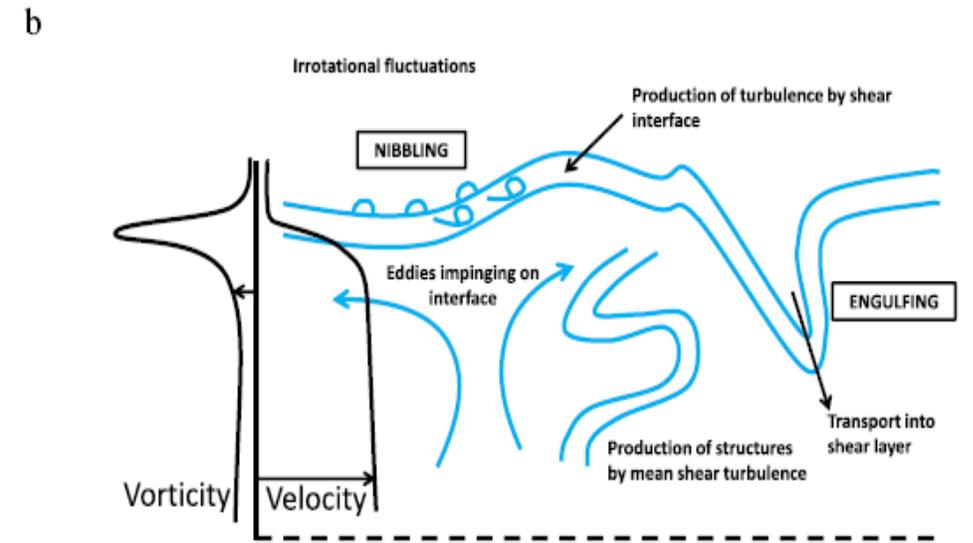
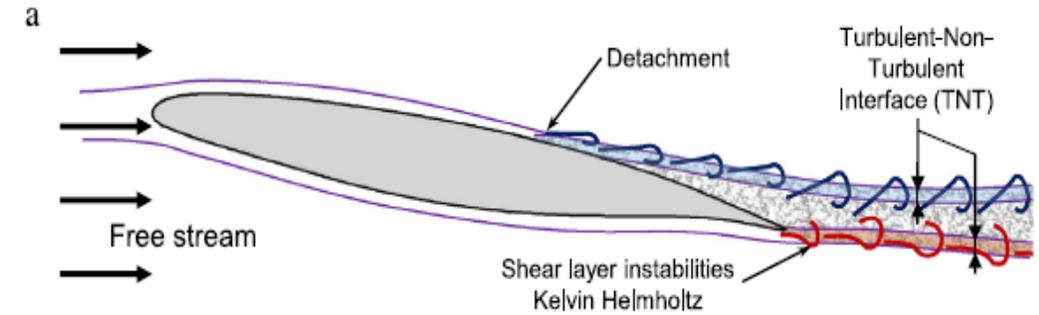
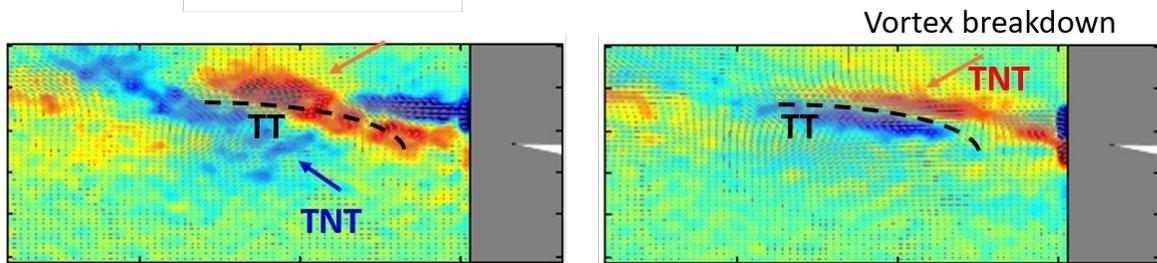
## **I. Régimes subsoniques correspondant aux phases de vol du décollage et d'atterrissage**

# Morphing: associated to the Eddy Blocking Effect

- TE vibration and TW, inject smaller-scale vortices, (Hunt *et al.* IUTAM 2008, Szubert, Hunt, Braza *et al.* JFS 2015).
- CW and CCW direction
- Breakdown of larger harmful vortices
- Constriction of the shear layers (Attenuation instabilities)
- Reduction of the wake's width



Attenuation of the trailing-edge shear-layer instability



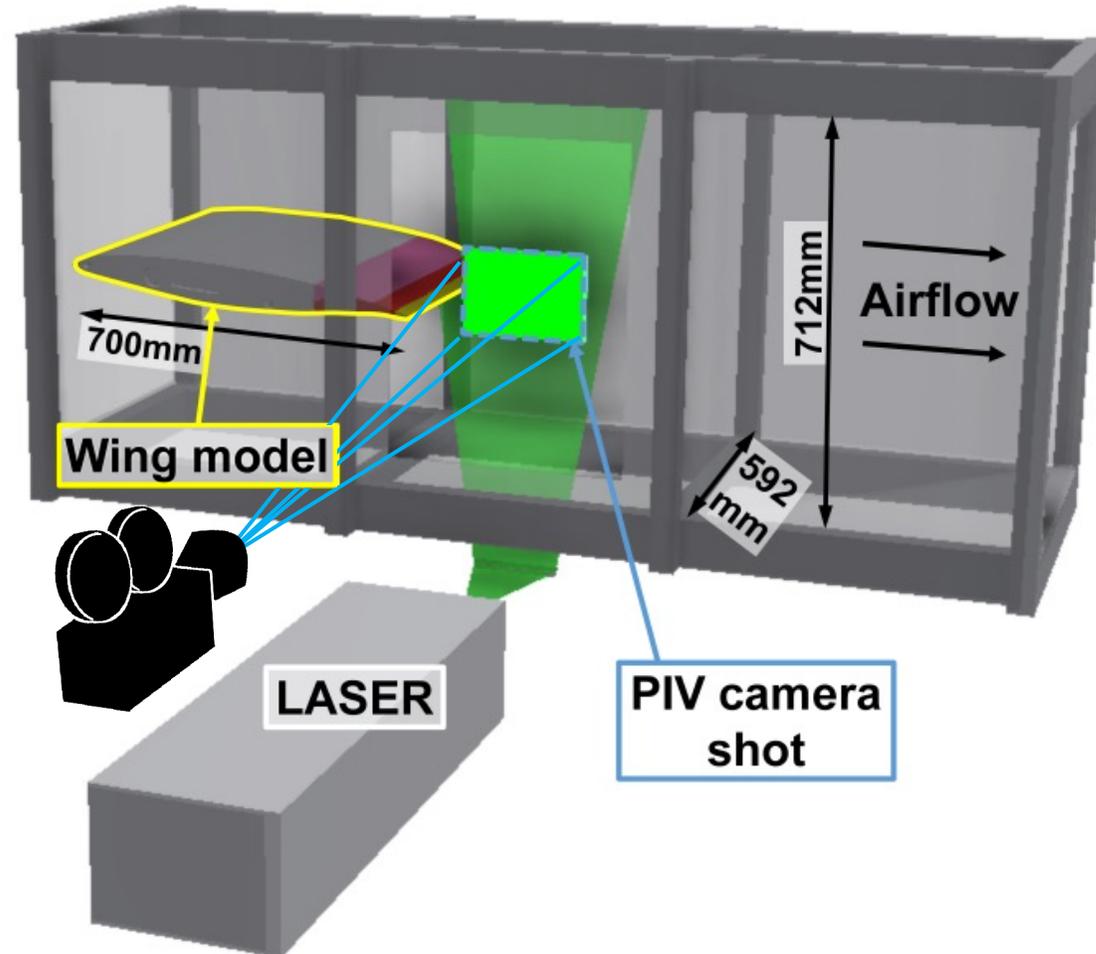
Schematic representation of the eddy blocking effect.

G. Jodin *et al.* JFS 2017

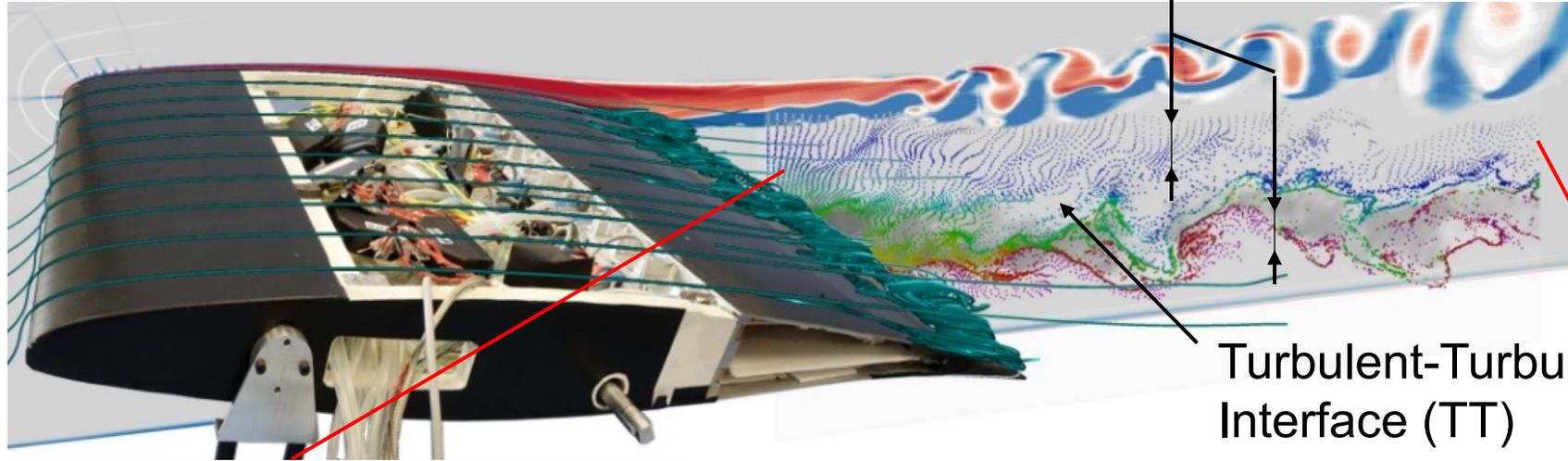
Trailing-edge piezo-actuation-vortex breakdown. Scheller *et al.* JFS 2015-PIV S4 wind tunnel

## □ Experimental set up

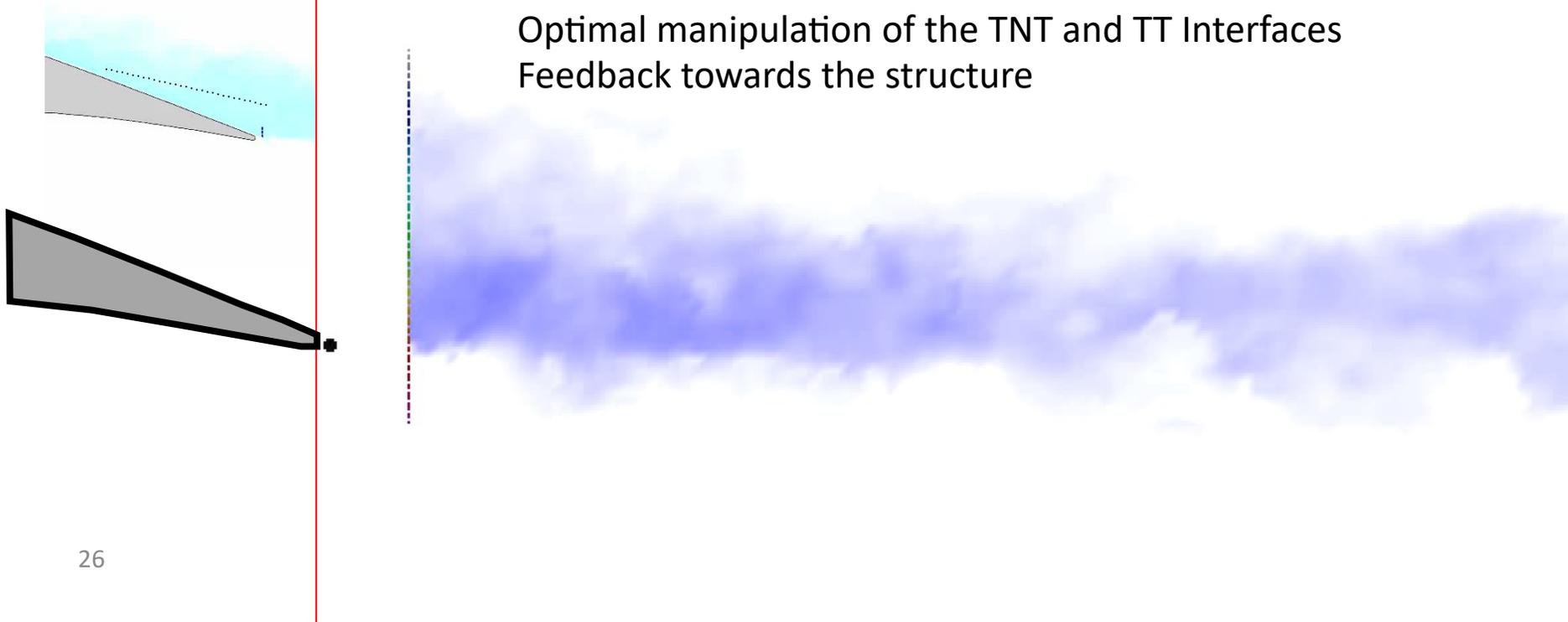
- Subsonic wind tunnel S4 IMFT
  - $U_{inf} < 35\text{m/s}$
- Wing chord  $C=0.7\text{m}$
- $Re_c=500\text{k}$  and  $1\text{M}$ 
  - Reynolds number relative to the chord
- Aerodynamic balance
- Embedded pressure sensors
- HS TR PIV measures<sup>(1)</sup>
  - High Speed Time Resolved Particle Image Velocimetry
  - From 6000 to 9500 fps
  - Software DAVIS7 and CPIV<sup>(2)</sup>



Turbulent-Non-Turbulent  
Interface (TNT)

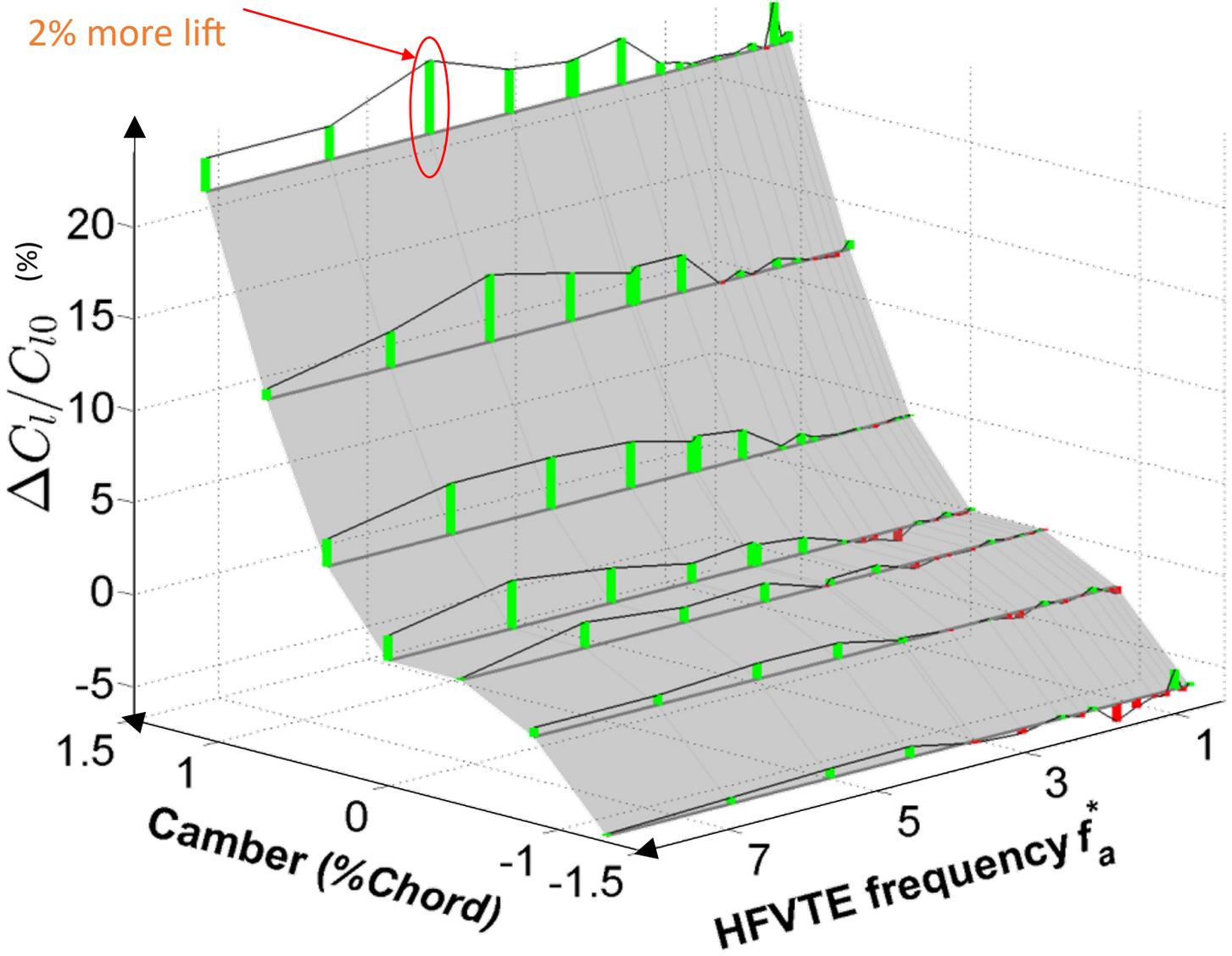


Optimal manipulation of the TNT and TT Interfaces  
Feedback towards the structure

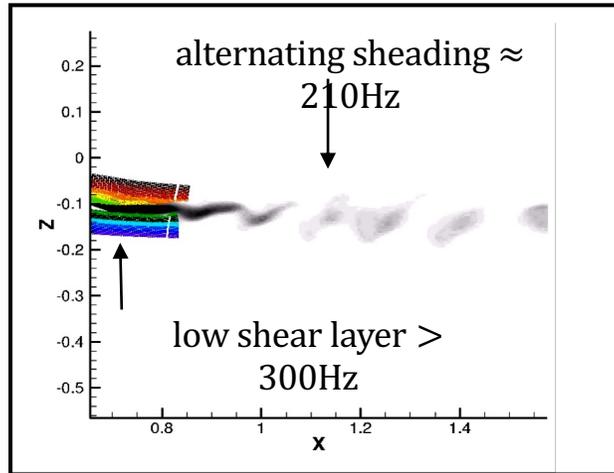


# Hybrid morphing effect

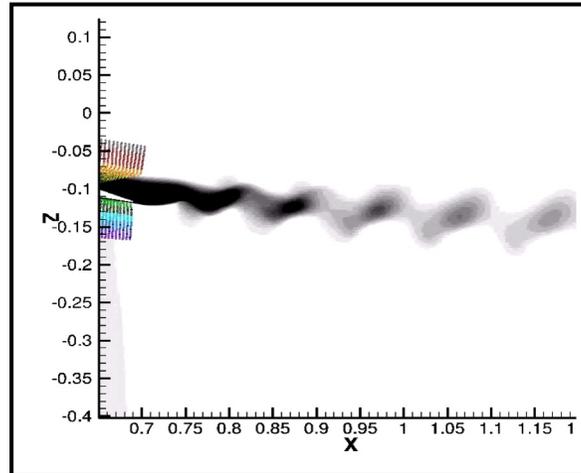
HFVTE adds  
2% more lift



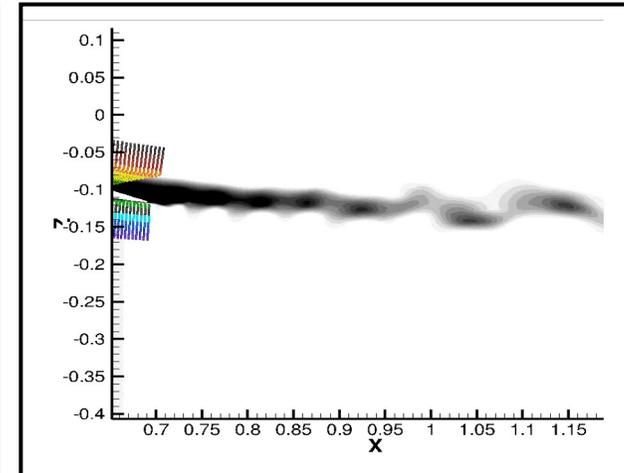
# Effect on Wake Dynamics



No Morphing Applied (Static)



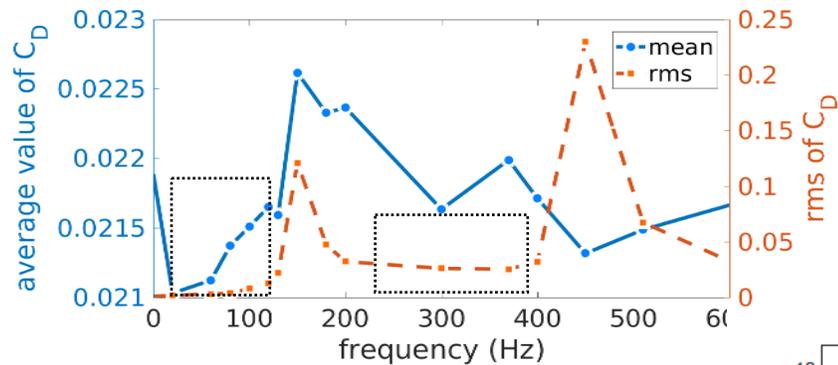
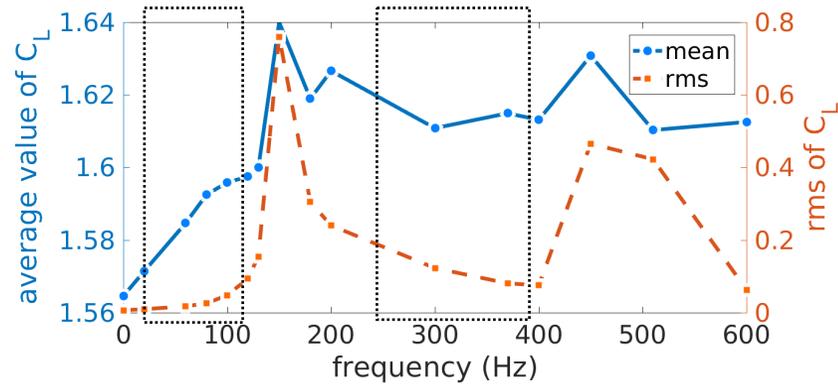
$f_a = 200\text{Hz}$  - amplitude 0.35mm



$f_a = 300\text{Hz}$  - amplitude 0.35mm

- Effect of vibrations on flow field ; **lock-in** leading to reinforcement of the lower shear layer leading to **suppression** of the von Kármán alternating vortex shedding.

# Effects on the Aerodynamic Forces



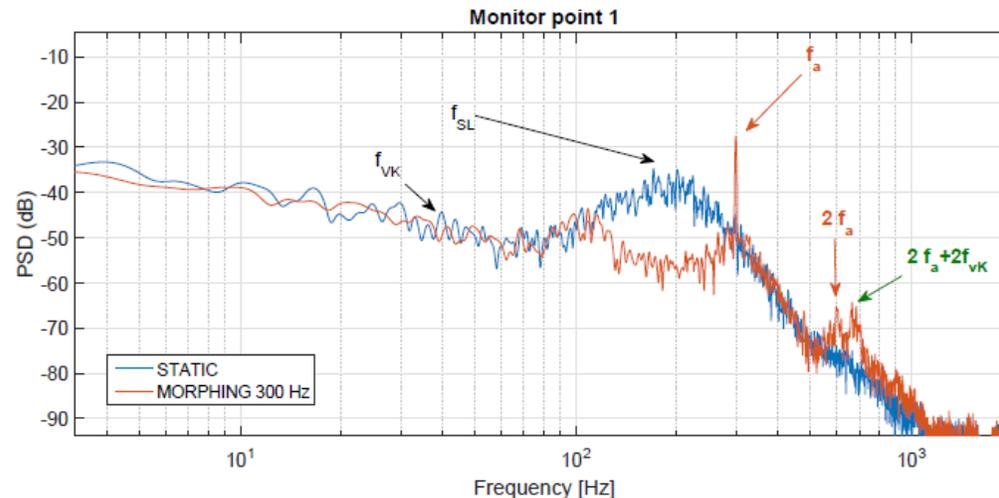
Variation of lift (top) and drag (bottom) coefficients with the actuation temperature. Zero frequency corresponds to no-actuation (Static).

Table: Effect of vibrating actuation on the averaged aerodynamic performance.

	CL	CD	CL/CD
<b>Static</b>	1.5646	0.0219	71.5
<b>60 Hz</b>	1.5894	0.0214	74.4 (4.1%)
<b>300 Hz</b>	1.6147	0.0217	74.5 (4.2%)



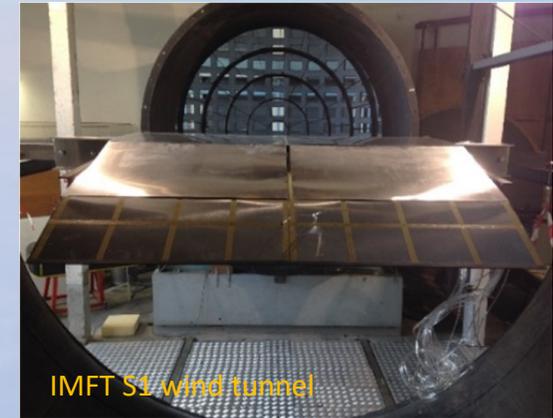
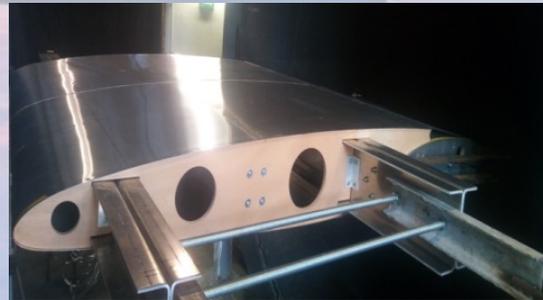
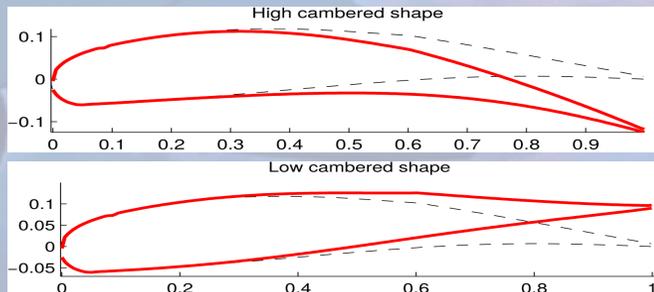
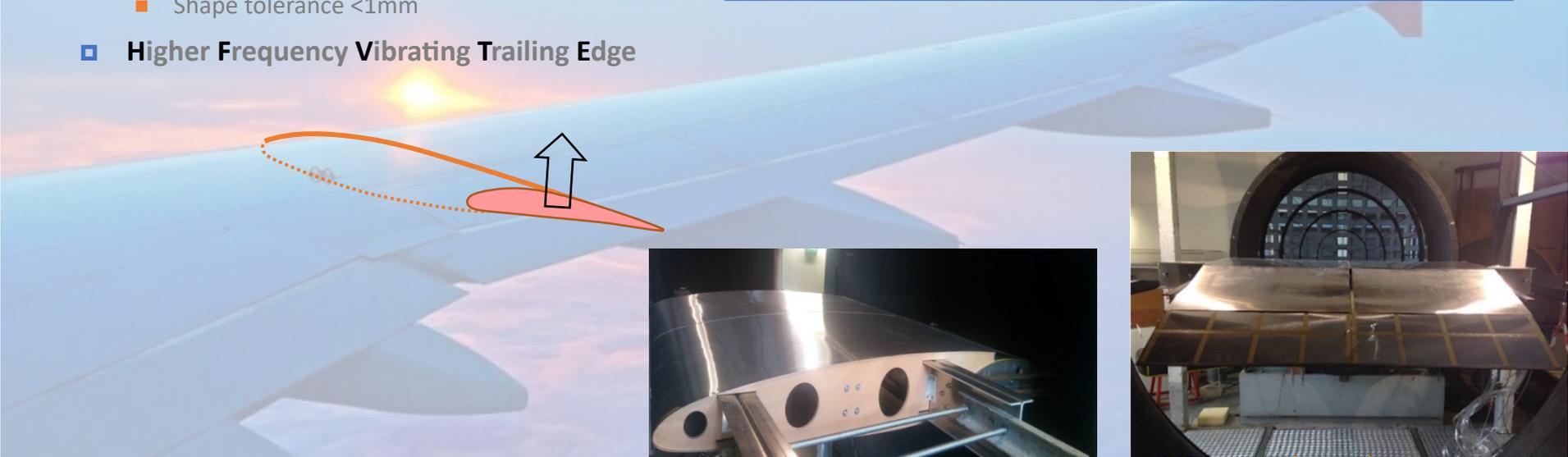
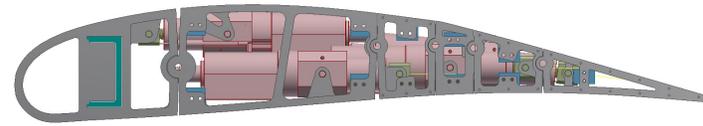
Noise sources reduction



## THE LARGE - SCALE (LS) Prototype near full scale - SMS project

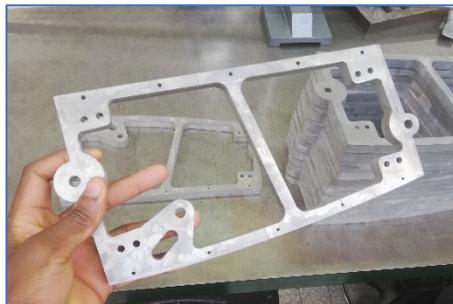
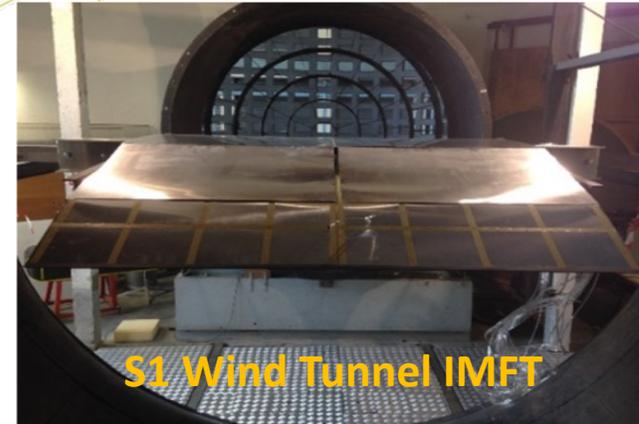
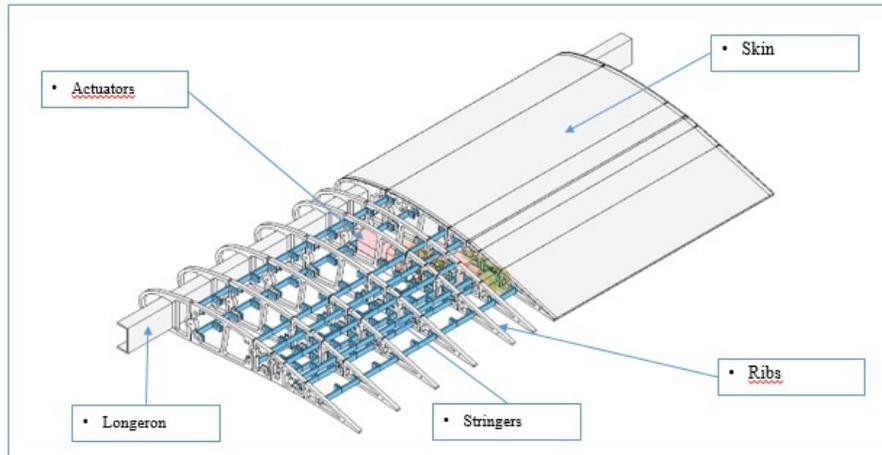
- ▣ Adaptive morphing flap
  - No impact on high lift function
- ▣ Based on A320 geometry
  - 1m chord, 2m & 4m span
- ▣ Camber control under realistic loads
  - Aerodynamic forces about 1.5tons
  - Trailing edge displacement +/- 10%C
  - Shape tolerance <1mm
- ▣ Higher Frequency Vibrating Trailing Edge

SMS Book in “Notes on Numerical Fluid  
Mechanics and Multidisciplinary Design”  
Feb. 2023, Vol. 153, Springer



Full scale subsonic  
Morphing prototype of A320 type: flap's chord of 1m  
S1 wind tunnel IMFT  
The SMS LS Prototype Experimental set-up

# MORPHING FLAP FINAL DESIGN & MANUFACTURING



Notes on Numerical Fluid Mechanics  
and Multidisciplinary Design 153

Marianna Braza ·  
Jean-François Rouchon ·  
George Tzabiras · Franco Auteri ·  
Pawel Flaszynski *Editors*

# Smart Morphing and Sensing for Aeronautical Configurations

Prototypes, Experimental and Numerical  
Findings from the H2020 N° 723402  
SMS EU Project



## Smart Morphing & Sensing Eu H2020 project

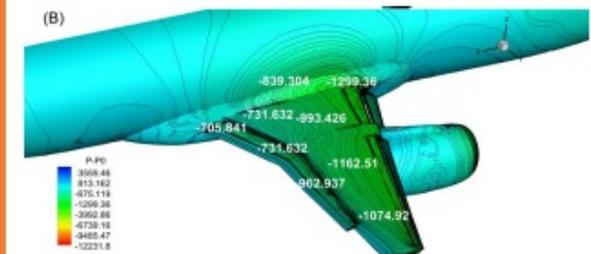
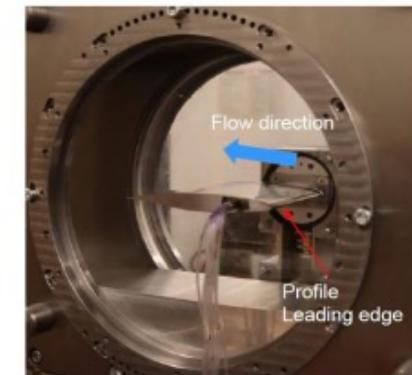
- Experimental – Large Scale prototype wing-flap
  - ✓ +7 % in lift (Take-off)
  - ✓ +4 % in lift (landing)
  - ✓ -7% to -10% in **drag reduction** (landing)
- Numerical :
  - ✓ +6-7% in lift-to-drag (take-off)
  - ✓ +4% in lift and +8% lift-to-drag (landing)
- ❑ [F. Auteri et al. \(2022\) Aerospace Science and Technology](#)

- Experimental transonic Reduced Scale prototype wing-flap
  - ✓ -4 % in drag reduction (cruise)
  - ✓ +3 % in lift-to-drag (cruise)
- Numerical :
  - ✓ +5,5% in lift-to-drag (cruise)
  - ✓ -9% in **drag reduction** (cruise)
- ❑ [J. B. Tô et al. \(2019\) Journal of Fluids and Structures](#)

- Numerical – Airbus A320 airplane
  - ✓ +7 % in lift (Take-off)
  - ✓ +1.3 % in lift-to-drag (take-off)
- ❑ [A. Marouf et al. 3AF 2020+1, A. Marouf \(PhD\). \(2020\) co-supervised: M. Braza & Y. Hoarau](#)



Large-Scale A320 SMS prototype (near scale 1) in the wind tunnel of POLIMI



# BEALIVE : Travelling Waves - a first step towards the « live-skin »: the A320 morphing prototype of 70 cm chord at 10° angle of incidence, Re=1Million in take-off conditions



Invited Special Technology Session

“Smart wing design through Turbulence Control”

Paper ST04: Electroactive morphing effects through travelling wave actuation on the aerodynamic performance of a morphing wing by means of numerical simulation

Abderahmane Marouf<sup>1,2</sup>, Rajaa El Akoury<sup>2</sup>, César Jimenez-Navarro<sup>2</sup>, Alexandre Ninet<sup>1</sup>, Yannick Hoarau<sup>1</sup> and Marianna Braza<sup>2</sup>

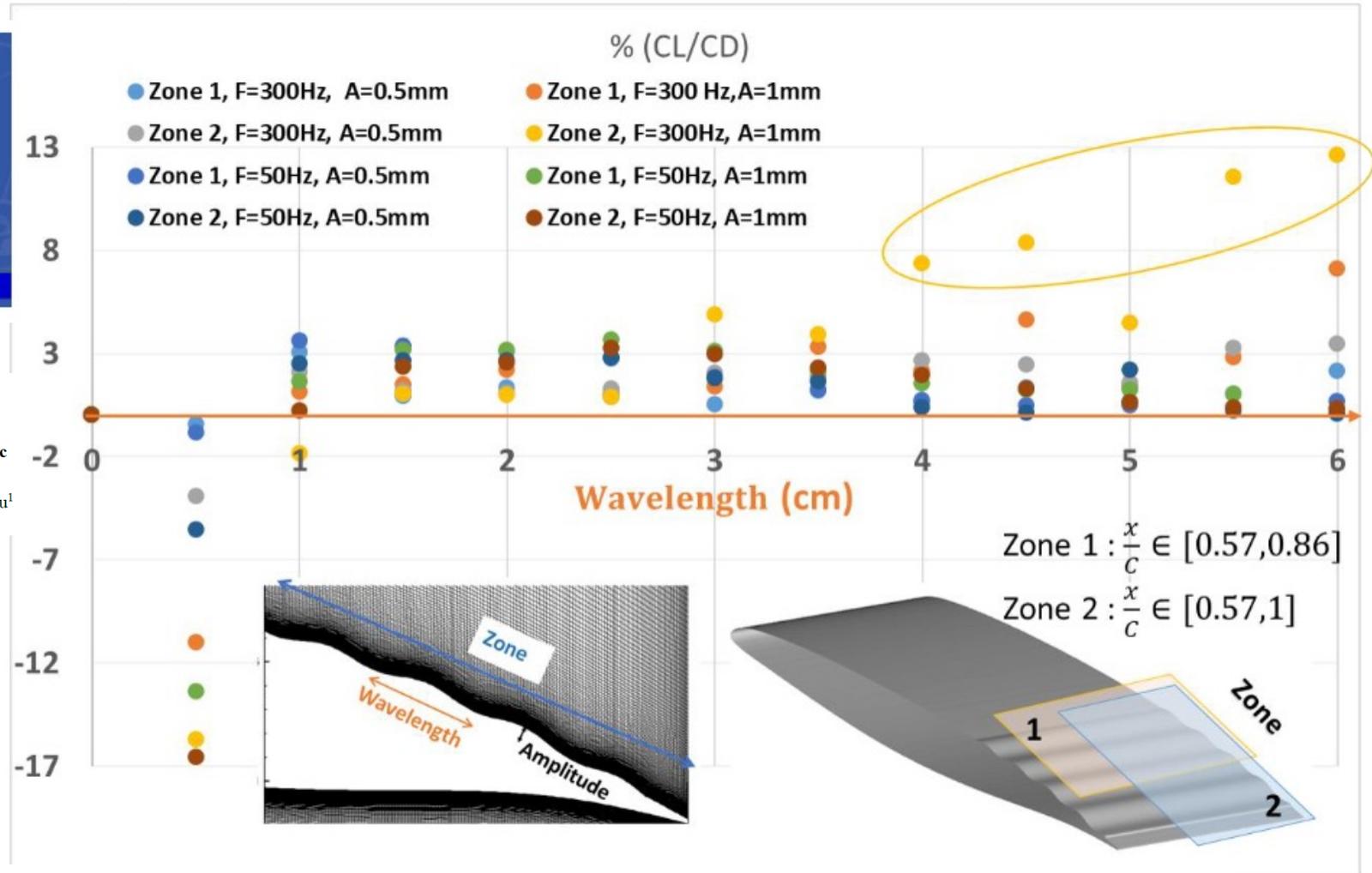
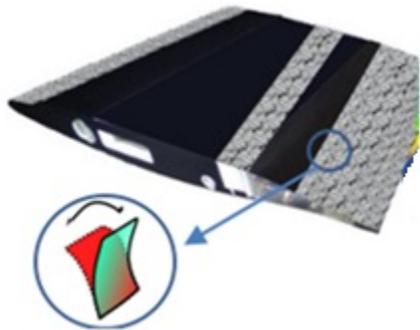


Fig. 1. Lift - to Drag gain/loss percentage comparing to the non-morphing (static) case through Hi-Fi simulations by means of the NSMB code, carried out by IMFT and UNISTRA/ICUBE Laboratories, obtained from the effects of a travelling wave over a specific zone along the chord and the span. The figure shows gains reaching 13% of performance increase. Re=1 Million, angle of incidence 10°, A320 wing.

# CONCLUSION

- Le design des ailes bio-inspiré conduit à des performances aérodynamiques **considérablement accrues**
- Echelles laboratoire vers échelles réelles
- Bénéfique pour la **diminution d'énergie** de propulsion nécessaire relative à toutes formes d'énergie: carburants actuels et nouveaux: diminution des émissions (CO<sub>2</sub>, NOx, Sox, particules, ...)  
propulsion H2: réduction du volume nécessaire : important pour le stockage et les nouveaux designs d'avions à zéro émissions
- Bénéfique pour la **réduction du bruit** aérodynamique notamment en phases de décollage/atterrissage