

# Original MEMS wall shear stress sensors developed for separation detection and active flow control on a flap model

C. GHOUILA HOURI<sup>a,b,d</sup>, R. SINDJUI<sup>a,e</sup>, Q. GALLAS<sup>b,f</sup>, E. GARNIER<sup>b,g</sup>,  
A. MERLEN<sup>a,b,h</sup>, R. VIARD<sup>c,i</sup>, A. TALBI<sup>a,j</sup>, P. PERNOD<sup>a,k</sup>

- a. Univ. Lille, Centrale Lille, UVHC, ISEN, LIA LICS/LEMAC - IEMN UMR CNRS 8520, F-59000 Lille, France
- b. ONERA, Chemin de la Hunière 91123 Palaiseau, France
- c. Fluiditech, Thurmelec, 68840 Pulversheim, France
- d. [cecile.ghouila@onera.fr](mailto:cecile.ghouila@onera.fr)
- e. [ralph.sindjui@iemn.univ-lille1.fr](mailto:ralph.sindjui@iemn.univ-lille1.fr)
- f. [quentin.gallas@onera.fr](mailto:quentin.gallas@onera.fr)
- g. [eric.garnier@onera.fr](mailto:eric.garnier@onera.fr)
- h. [alain.merlen@onera.fr](mailto:alain.merlen@onera.fr)
- i. [romain.viard@thurmelec.fr](mailto:romain.viard@thurmelec.fr)
- j. [abdelkrim.talbi@iemn.univ-lille1.fr](mailto:abdelkrim.talbi@iemn.univ-lille1.fr)
- k. [philippe.pernod@iemn.univ-lille1.fr](mailto:philippe.pernod@iemn.univ-lille1.fr)

## Résumé :

*Ce papier présente un micro-capteur de frottement pariétal conçu pour la détection du phénomène de décollement de la couche limite et pour le contrôle d'écoulement en boucle fermée. Le principe du capteur est celui de l'anémométrie à film chaud. Le capteur est micro-structuré, avec trois fils parallèles, libérés du substrat de silicium et présentant un haut rapport d'aspect (rapport longueur sur largeur), et une série de micro-ponts perpendiculaires aux fils, assurant robustesse mécanique et isolation thermique. Ce design permet d'obtenir un fort gradient de température et une distribution homogène de la température le long des fils. Le capteur peut fonctionner, au choix, en mode courant constant ou température constante, avec une boucle de contrôle sur le courant permise par le découplage de la chauffe et de la mesure. Le capteur est soudé sur un circuit imprimé flexible pour permettre son intégration en paroi de la soufflerie de couche limite turbulente. Les essais ont été réalisés dans des configurations d'écoulement attaché et d'écoulement détachés, et ont permis de démontrer la sensibilité du capteur au frottement pariétal, jusqu'à 2.4 Pa, ainsi que sa capacité à détecter la bulle de recirculation en situation d'écoulement décollé.*

## Abstract:

*This paper presents an efficient and high-sensitive micro-electro-mechanical system (MEMS) sensor designed for wall shear stress measurement. The main technical application targeted is flow separation detection for closed-loop active flow control. The sensor is a temperature-resistance transducer operating on heat transfer. The device is micro-structured with three substrate-free wires presenting a high aspect ratio, and periodic perpendicular micro-bridges ensuring mechanical toughness and thermal insulation. This design achieves a high temperature gradient and a homogeneous temperature distribution along the wires. The sensor operates in both constant current*

*mode and constant temperature mode, with feedback on current enabled by the uncoupling between heating and measure. Welded on a flexible printed circuit, the sensor is wall-mounted on a turbulent boundary layer wind tunnel. The experiments, conducted in both attached and separated flow configurations, demonstrate the sensor sensitivity to wall shear stress up to 2.4 Pa and the ability of the 3-wires based design to perform flow direction sensing for back-flow detection in separated flow situation.*

**Mots clefs: Capteur de frottement pariétal, capteur MEMS, Détection du décollement, Contrôle d'écoulements, Contrôle des écoulements en boucle fermée**

## 1 Introduction

La réduction de la consommation de carburant et les émissions de CO<sub>2</sub> qui en découlent, sont l'un des principaux objectifs actuels de la recherche dans les véhicules et l'une des solutions est d'améliorer les performances aérodynamiques des appareils. Le contrôle actif des écoulements est l'un des moyens d'atteindre cet objectif: le bénéfice potentiel d'un système efficace de contrôle d'écoulements peut atteindre des milliards de dollars économisés par rapport aux coûts annuels du carburant [1].

En supprimant et / ou en retardant le décollement, le contrôle actif d'écoulement augmentera les performances aérodynamiques des ailes. L'un des moyens pour atteindre cet objectif est de contrôler l'écoulement d'air autour des ailes, gouvernails, etc. A un angle d'attaque élevé, l'apparition du décollement de la couche limite diminue les performances aérodynamiques sur deux aspects: la portance est réduite et la traînée augmente. Par conséquent, l'objectif principal du contrôle actif est de maintenir l'écoulement attaché sur la plus grande partie de l'aile.

Des mesures précises des paramètres de l'écoulement à proximité de la paroi jouent un rôle clé pour le contrôle actif. Des capteurs sont nécessaires pour mesurer ces paramètres à hautes fréquences avec une résolution spatiale élevée [2-4] et les capteurs de microsystèmes électromécaniques (MEMS) sont des candidats potentiels pour des mesures précises et localisées [3,5,6].

L'un des principaux paramètres considérés lors du décollement est la contrainte de cisaillement  $\tau$  définie par l'Equation 1:

$$\tau = \mu \cdot \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)_{wall} \quad (1)$$

où  $u$  est la vitesse de l'écoulement,  $\mu$  la viscosité dynamique de l'air, et  $y$  la coordonnée verticale. Au point de décollement, la contrainte de cisaillement de la paroi disparaît, et devient négative lorsque le fluide est décollé, du fait de la zone de recirculation. Les variations de contraintes de cisaillement sont souvent mesurées indirectement par anémométrie à fil chaud. Le principe de base de l'anémométrie consiste en un fil métallique chauffé par un courant électrique et refroidi par le fluide environnant. Les capteurs correspondants sont appelés fil chaud lorsque le fil est libre dans l'écoulement, et film chaud lorsque le fil est déposé sur une membrane isolante.

Les fils chauds et les films chauds peuvent être fabriqués en utilisant des techniques de micro-fabrication issues de la microélectronique [7, 8]. Dans cet article, nous présentons les travaux réalisés sur un micro-capteur thermique original et efficace, conçu comme une structure intermédiaire entre les films chauds et les fils chauds, pour la détection du décollement [9-11]. Ce transducteur est capable de mesurer des variations de frottement pariétal et de détecter la direction d'écoulement, en particulier la recirculation présente dans un écoulement décollé. Cet article présente la conception du capteur, puis les caractérisations électriques et thermiques et enfin les essais conduits dans une soufflerie à couche limite turbulente, dans des configurations d'écoulements attaché et décollé.

## 2 Le micro-capteur

### 2.1 Design du capteur

La partie sensible du capteur est basée sur une structure à 3 fils placée perpendiculairement à l'écoulement (Figure 1 (a)). Le fil central agit comme un fil chaud classique: un fil métallique en or est chauffé par un courant électrique et refroidi par le courant, comme le montre la Figure 1 (b). Un point particulier est qu'il est structuré en multicouche: sur le dessus, la résistance d'or, puis une mince couche d'oxyde de silicium pour isoler la résistance d'or de la résistance nickel-platine placée encore en dessous. Le fil central nickel-platine est le fil de mesure. Le chauffage et la mesure ont en effet été électriquement désaccouplées pour améliorer le rapport signal / bruit.

Placés de part et d'autre du fil central, deux fils en nickel-platine supplémentaires visent à détecter le sens d'écoulement, en utilisant la différence de température entre eux, car le fil amont sera plus refroidi que l'aval.

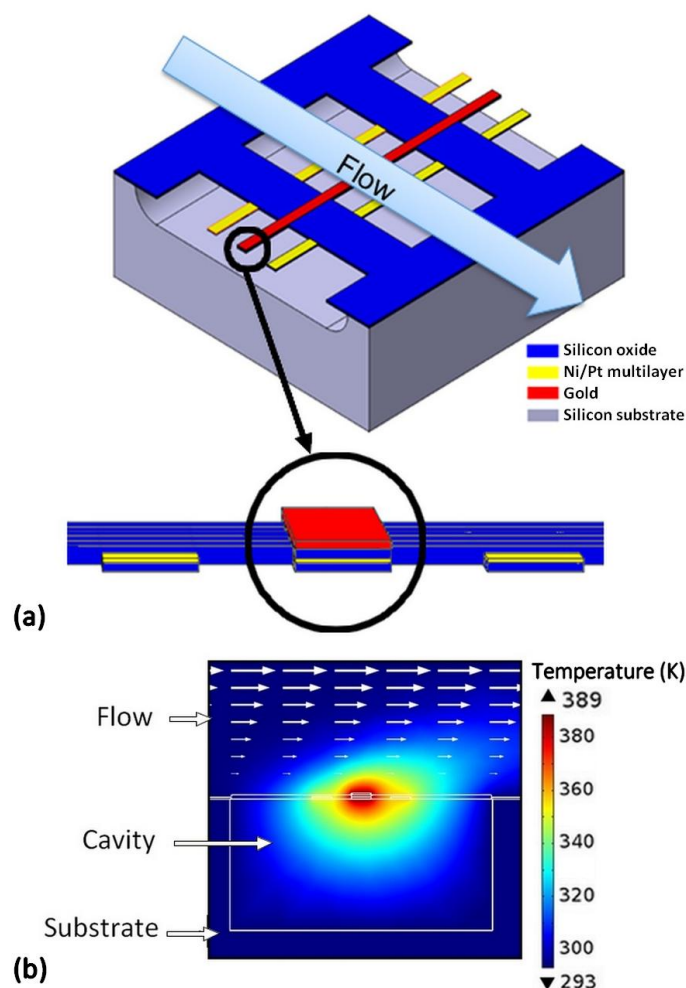


Figure 1: (a) Schéma du capteur (b) Simulation COMSOL Multiphysics

### 2.2 Fabrication en salle blanche et packaging sur circuit électronique flexible

Plus d'une centaine de capteurs ont été fabriqués sur un wafer de silicium de 3 pouces de diamètre, utilisant des outils et des équipements de microélectronique et des techniques de micro-usinage de l'IEMN (Figure 2 (a)). Le procédé de micro-fabrication est décrit en détail dans [1]. Il s'agit d'un

procédé complet d'usinage de surface, compatible avec les techniques de fabrication de semiconducteurs, type Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS). Il faut sept étapes principales et quatre masques pour fabriquer les capteurs.

Après la fabrication, les dispositifs sont découpés. La Figure 2 (b) présente la puce du capteur par rapport à un centime d'euros: la puce de capteur mesure environ 4 mm de long par 3 mm de large, mais la plus grande partie de la surface est utilisée par les plots de contacts électriques en or. La partie sensible du capteur, visible sur la figure 3 (a), est en effet de 1 mm de long pour 30  $\mu\text{m}$  de largeur seulement. Il se compose des trois fils et des micro-ponts perpendiculaires, comme le montre la Figure 3 (b). Les images de la Figure 3 (a) et (b) ont été réalisées en utilisant la technique de microscopie électronique à balayage (MEB).

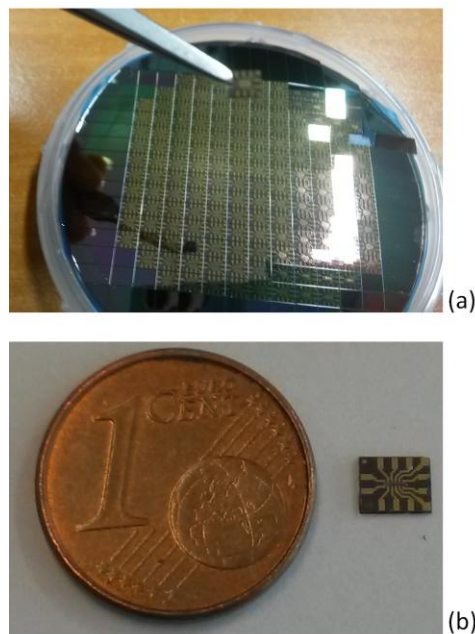


Figure 2. (a) Photographie d'un capteur et du wafer (b) Capteur versus 1 centime d'euro

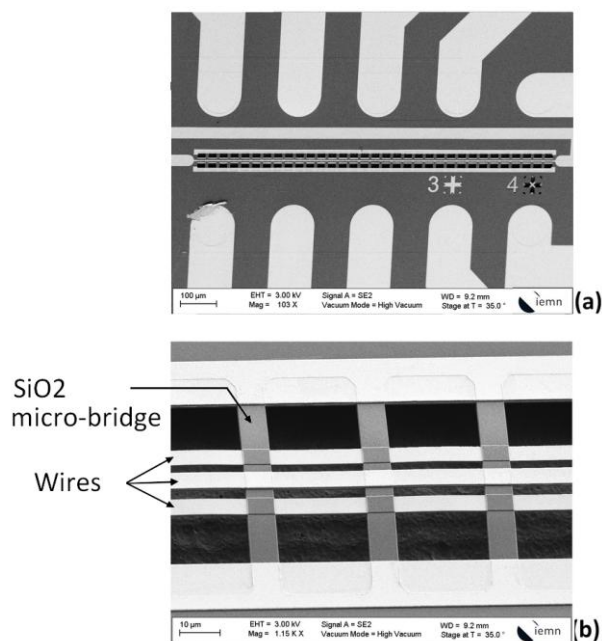


Figure 3. Photo MEB du capteur : (a) structure globale (b) zoom sur la partie sensible

Les dispositifs sont soudés avec une pâte CMS sur un circuit imprimé flexible composé de 35  $\mu\text{m}$  de cuivre et de 50  $\mu\text{m}$  de polymère souple, comme on le voit sur la Figure 4. Il permet de monter le dispositif le plus affleurent possible sur des surfaces planaires ou courbes.

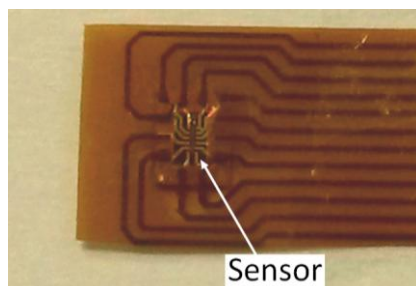


Figure 4. Capteur dans son packaging flexible

## 2.4 Caractérisations électriques et thermiques

Les premières caractérisations effectuées sur le capteur ont pour but de déterminer les performances électriques et thermiques des capteurs. Trois points principaux ont été caractérisés: le coefficient température-résistance (TCR), l'élévation de température avec la puissance de chauffe et la distribution de température le long des fils.

Le TCR considéré ici est une caractéristique du matériau multicouche Ni / Pt utilisé pour les fils de mesure. Pour les matériaux métalliques, la variation de résistance est directement proportionnelle à la variation de température à travers ce coefficient. La mesure du TCR a donné un résultat d'environ 2380 ppm/°C. Ce coefficient est essentiel pour déterminer le deuxième point principal, l'élévation de température atteinte par le dispositif. Un multimètre a mesuré les variations de résistance des fils de mesure alors qu'une source-mètre Keithley 2400 fournissait des courants de chauffage différents. Les résultats, présentés à la figure 6, démontrent la capacité du capteur à atteindre environ 8°C/mW pour le fil central et environ 5°C/mW pour les fils latéraux, avec un maximum de 12 mW. Les fils latéraux sont physiquement éloignés du fil chaud, avec 3  $\mu\text{m}$  d'air entre eux, alors que le fil central est seulement séparé du fil chaud d'or par 300 nm d'oxyde de silicium, utilisé pour l'isolation électrique. De petites différences surviennent entre les deux fils latéraux et sont dues à la dispersion du procédé de fabrication.

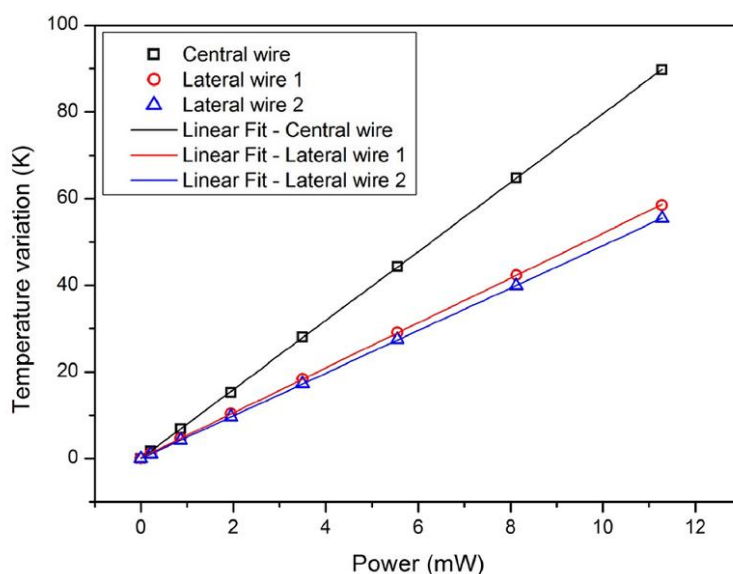


Figure 5. Caractérisation électrique du fil central et des fils latéraux [1]

### 3 Essais en soufflerie de couche limite turbulente

La réponse du capteur à un écoulement a été étudiée dans trois configurations différentes dans une soufflerie de la couche limite turbulente à ONERA Lille (Figure 6 (a)): la première permet des caractérisations écoulement attaché, pour étalonner le capteur, et les deux autres configurations permettent de produire un écoulement décollé: d'abord, un décollement à cause un obstacle géométrique, puis à cause d'un gradient de pression adverse.

La soufflerie présente une section d'essai carrée de 900 mm<sup>2</sup> et fonctionne à des vitesses d'écoulement allant de 0 à 40 m / s maximum.

#### 3.1 Essais en plaque plane : étalonnage des capteurs

Tout d'abord, le capteur a été caractérisé en configuration plaque plate, afin de procéder à son étalonnage. Collé sur un support isolant pour éviter les problèmes de court-circuit, le capteur a été monté en paroi de la soufflerie, comme le montre la Figure 6 (b). Une sonde à fil chaud Dantec placée sur un bras motorisé caractérise le profil de vitesse de la couche limite. Les expériences ont permis d'extraire l'épaisseur de mouvement  $\theta$  et le coefficient de frottement correspondant  $C_f$ , en utilisant la relation de Coles-Fernholz (Equation 1) développée dans [12]:

$$C_f = 2 \cdot \left[ \frac{1}{k} \cdot \ln(\text{Re}_\theta) + C \right]^{-2} \quad (1)$$

Où  $k = 0.384$ ,  $C = 4.127$ ,  $\text{Re}_\theta = \theta \cdot U_\infty / \nu$ ,  $U_\infty$  est la vitesse d'écoulement au centre de la soufflerie et  $\nu$ , la viscosité cinématique. La contrainte de cisaillement de la paroi est alors liée au coefficient de frottement de la peau en utilisant la relation (Equation 2):

$$\tau = 0.5 \cdot \rho \cdot U_\infty^2 \cdot C_f \quad (2)$$

où  $\rho$  est la masse volumique de l'air.

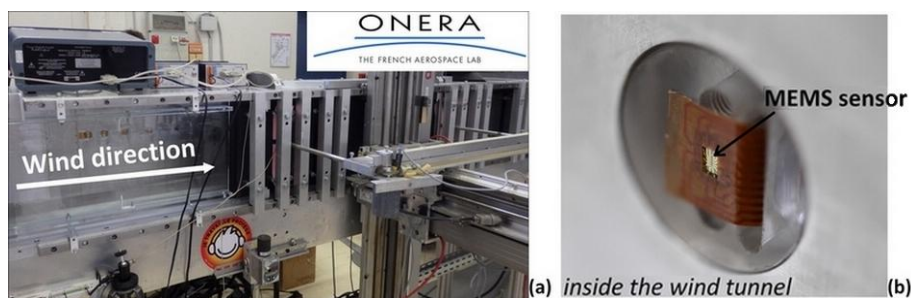


Figure 6. (a) Soufflerie de couche limite turbulente (b) Capteur monté dans la paroi de la soufflerie [9]

Le capteur a été utilisé en mode courant constant avec un courant de chauffe de 7 mA, correspondant à environ 11 mW. Les résultats (Figure 7) expriment la variation de résistance  $\Delta R$ , en pourcentage par rapport à la valeur sans écoulement mais soumise au courant de chauffe, en fonction du frottement pariétal, et ce pour les fils central et latéraux. L'amplitude de réponse pour le fil central est de 0,28% pour 2,4 Pa.

La différence entre les deux fils latéraux dépend de leur emplacement par rapport à la direction d'écoulement. Le fil amont est plus refroidi que celui en aval. Dans cette expérience, la réponse rouge est plus sensible que la réponse bleue du fait de la direction de l'écoulement. Si on tournait le capteur à

180°, le fil de réponse bleue deviendrait le fil amont, donc serait plus sensible que le fil de réponse rouge (voir [9] pour l'étude).

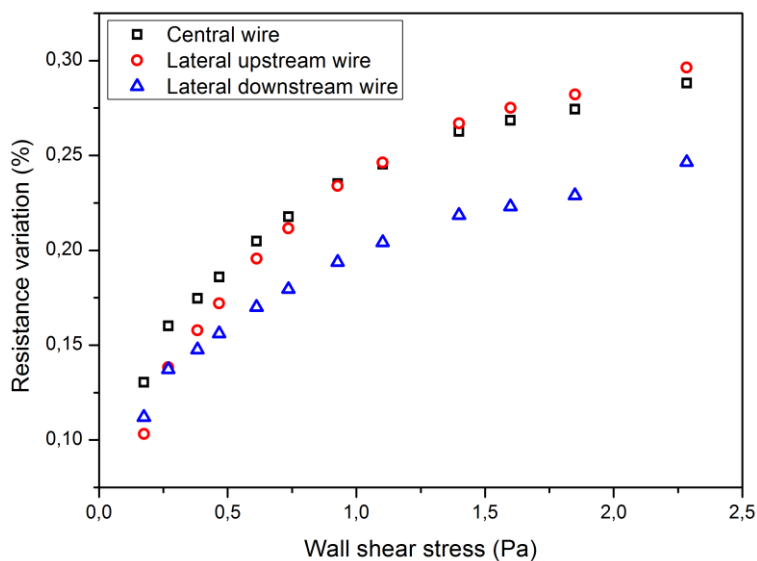


Figure 7. Mesures des variations de résistances en fonction du frottement pariétal

### 3.2 Essais avec des obstacles 2D : étude de la sensibilité au décollement

Pour la deuxième série d'essais en soufflerie, deux obstacles en forme de marche 2D ont été ajoutés à la paroi de la soufflerie (Figures 8 (a) et (b)). Un des obstacles fait 38 mm de haut et 38 mm de large, et le second fait 19 mm de haut et 18 mm de large. Le capteur est monté en paroi comme dans l'essai précédent, derrière les obstacles, à une distance lui permettant de se trouver dans la zone de recirculation. Définissant  $x$  la distance séparant l'obstacle et le capteur, et  $h$  la hauteur d'obstacle (Figure 8 (a)), le rapport  $x/h$  passe de 2,3 pour l'obstacle de 19 mm de haut à 0,9 pour l'obstacle de 38 mm de hauteur.

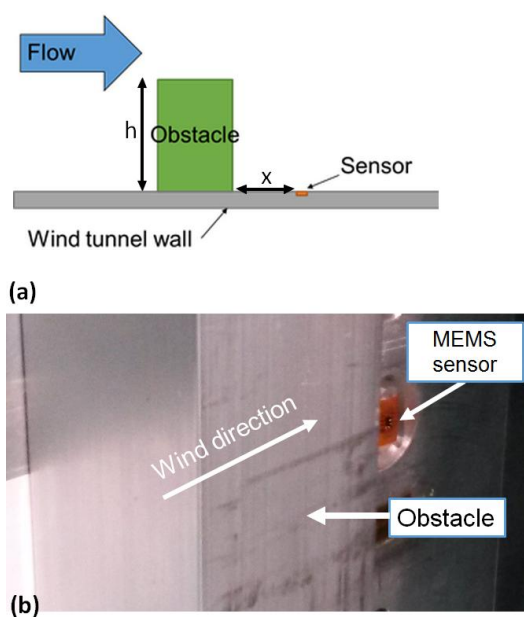


Figure 8. (a) Schéma du montage avec les obstacles (b) Montage dans la soufflerie

Les Figures 9 et 10 présentent les résultats obtenus pour respectivement le fil central (Figure 9) et les deux fils latéraux, en exprimant la différence de résistance entre eux (Figure 10).

Le comportement global du fil central du capteur est consistant avec un écoulement décollé : l'amplitude la réponse est graduellement moins importante à mesure que l'on approche le capteur de l'obstacle, ce qui est cohérent avec la diminution de frottement dans la bulle de recirculation d'un écoulement décollé

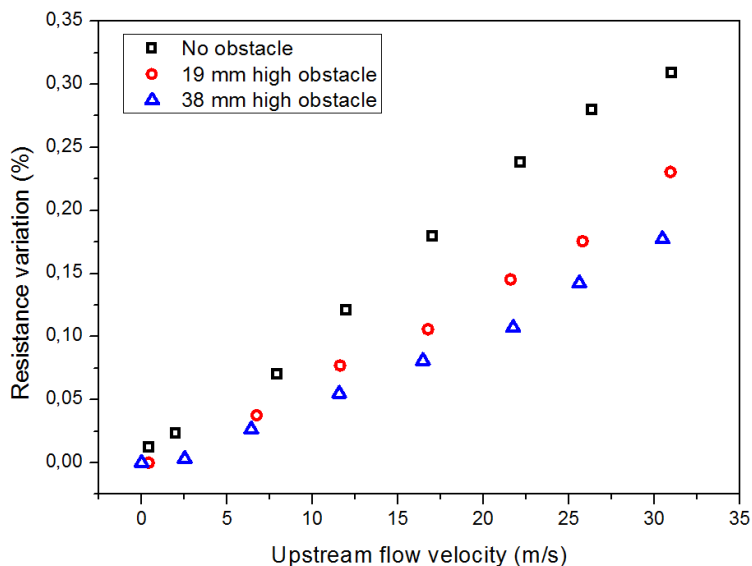


Figure 9. Mesure des variations de la résistance du fil central par rapport à la vitesse d'écoulement amont dans les trois configurations : sans obstacle, avec obstacle de 19 mm de hauteur et avec un obstacle de 38 mm de hauteur

Sur la Figure 10, le signe de la différence de résistance entre les deux fils latéraux change quand les obstacles sont en place, indiquant un changement de direction de l'écoulement, à nouveau cohérent avec le décollement. Ce résultat démontre la capacité du capteur à détecter le changement de direction dans la bulle de recirculation.

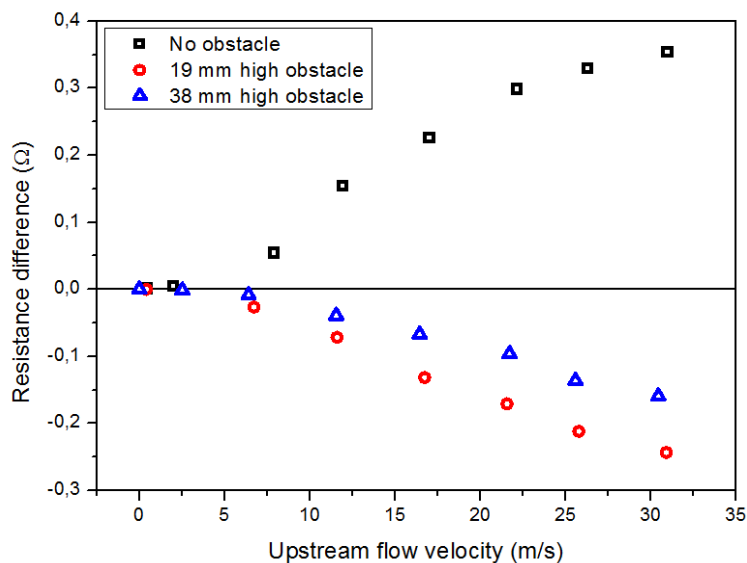


Figure 10. Mesure de la différence de résistance des fils latéraux par rapport à la vitesse d'écoulement amont dans les trois configurations : sans obstacle, avec obstacle de 19 mm de hauteur et avec un obstacle de 38 mm de hauteur



### 3.3 Essais avec une maquette d'aile : étude de la sensibilité au décollement

Après avoir démontré la capacité du capteur à détecter le changement de direction dans une bulle de recirculation d'un décollement décollé, nous avons placé le capteur sur une aile NACA 0020 en bois, pour une troisième série d'essais. L'aile est large de 30 cm pour s'intégrer dans la veine de la soufflerie et a une corde  $c$  de 25 cm de long. Le capteur est directement collé sur la surface de l'aile, et le packaging flexible lui permet de s'adapter à la surface du modèle. Pour ces expériences, la vitesse de l'écoulement reste constante et l'angle d'attaque change. L'objectif est ici de détecter le décollement, se produisant dans une situation de gradient de pression adverse. Le dispositif est placé à 1 cm du bord de fuite (Figure 11), à  $x/c = 0.96$ .

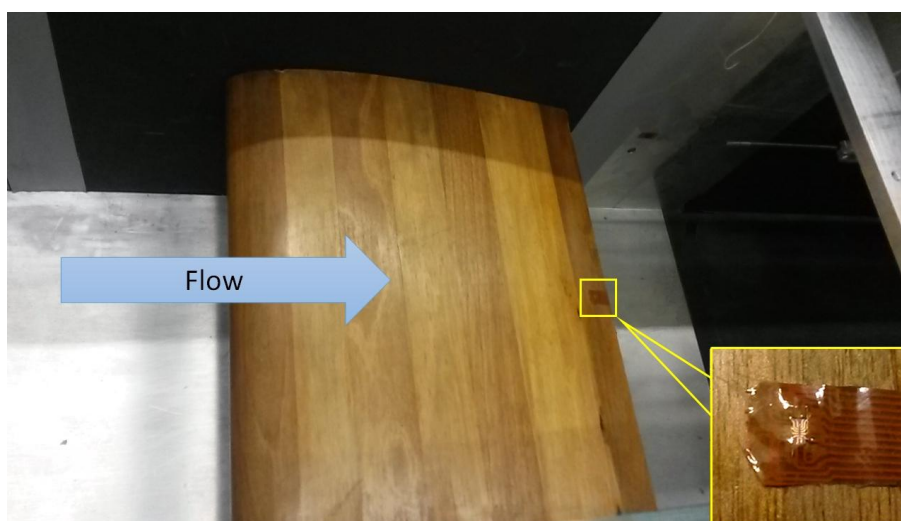


Figure 11. Montage de la maquette NACA 0020 en soufflerie et visualisation d'un capteur MEMS

Les résultats sont présentés en Figure 12 et 13. A nouveau, la première figure, la Figure 12, présente la réponse du fil central tandis que la seconde figure, la Figure 13, présente la différence des deux fils latéraux. L'étude a été menée pour 3 vitesses différentes : 18 m/s, 22 m/s et 26 m/s. Le nombre de Reynolds prends donc les valeurs 288 461 puis 352 564 et enfin 416 667.

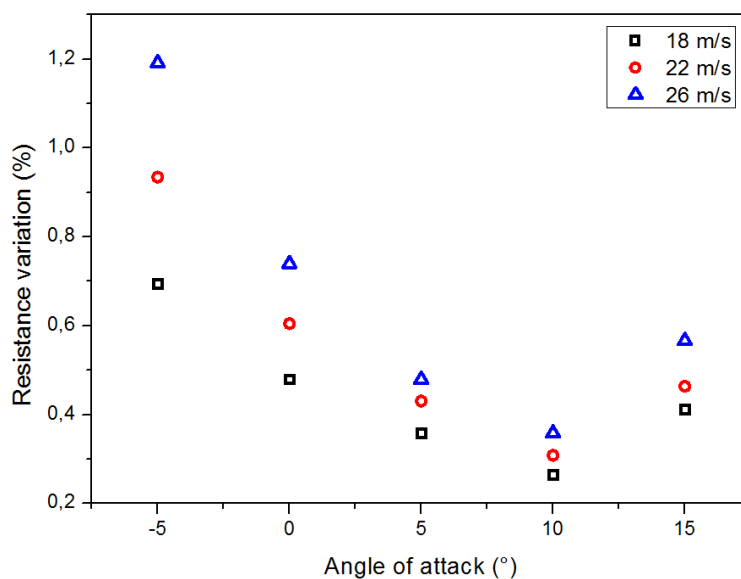


Figure 12. Mesure des variations de la résistance du fil central par rapport à l'angle d'attaque pour des vitesses de 18 m/s, 22 m/s et 26 m/s

Sur la Figure 12, on constate que le frottement diminue avec l'angle d'attaque puis augmente après  $10^\circ$ . En parallèle, on constate sur la Figure 13 que le signe de la différence de résistance s'inverse entre  $5^\circ$  et  $10^\circ$ . On en déduit qu'entre ces deux angles, l'écoulement décolle pour les trois vitesses considérées. Malheureusement, le montage ne permet pas de réaliser des mesures entre  $5^\circ$  et  $10^\circ$  avec une mesure précise de l'angle.

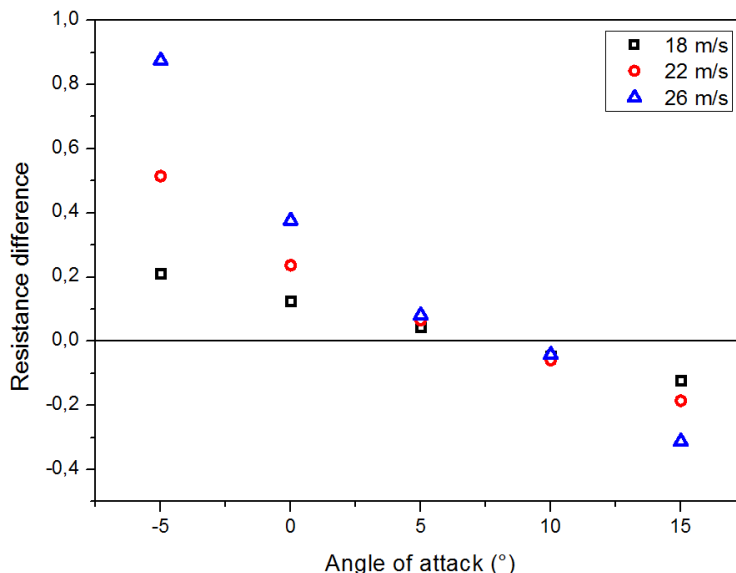


Figure 13. Mesure de la différence de résistance des fils latéraux par rapport à l'angle d'attaque pour des vitesses de 18 m/s, 22 m/s et 26 m/s

Des calculs utilisant le logiciel XFOIL ont donc été réalisés afin de valider les résultats expérimentaux. Sur la Figure 14, le facteur de forme H calculé en  $x/c = 0.96$  est exprimé en fonction de l'angle d'attaque, pour la vitesse 22 m/s. Considérant que l'écoulement décolle pour H supérieur à 2.5 [13], les résultats numériques indiquent un décollement pour un angle d'attaque de  $7^\circ$ , ce qui valide les mesures.

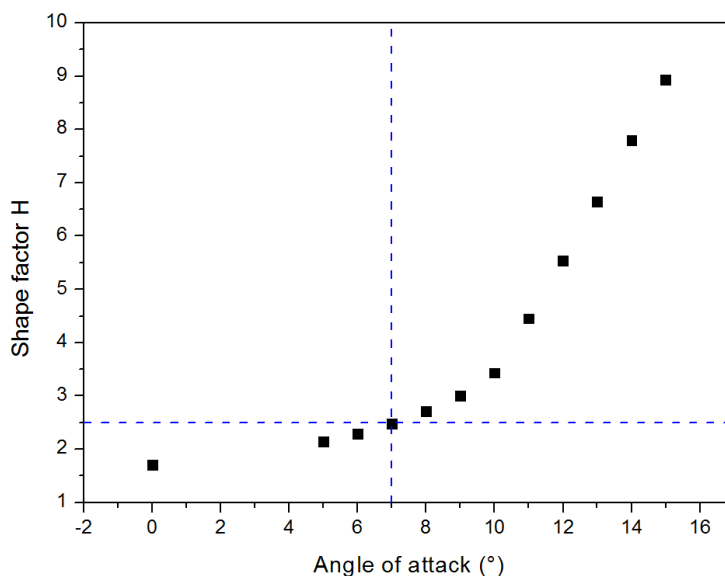


Figure 14. Facteur de forme H en fonction de l'angle d'attaque en  $x/c = 0.96$  – Simulation XFOIL

## 5 Conclusion and perspectives

En conclusion, cet article présente les travaux réalisés sur un capteur thermique MEMS original, conçu pour la détection du décollement de la couche limite. Ce capteur est en effet capable de mesurer la variation de frottement pariétal en utilisant le principe d'anémométrie à fil chaud, et de détecter la direction d'écoulement au même endroit. L'utilisateur est donc capable d'obtenir simultanément deux paramètres de l'écoulement, l'amplitude et la direction du vecteur de frottement pariétal, qui peuvent augmenter la stabilité et la robustesse des stratégies de contrôle d'écoulements. Le capteur a été testé en différentes configurations : plaque plane, ajout d'un obstacle amont, au bord de fuite d'une maquette d'aile. La détection de la bulle de recirculation a pu être démontrée, tant pour les essais avec les obstacles qu'avec l'aile NACA 0020.

L'ensemble des caractérisations menées en soufflerie de couche limite ont permis d'assurer les performances des capteurs MEMS. Douze capteurs seront alors montés sur une maquette de volet motorisé (Figure 15), pour des essais de contrôle d'écoulement dans la soufflerie L1 de l'ONERA Lille (2.4 m de diamètre de veine, 0 à 70 m/s). Sur cette maquette, les douze capteurs seront installés le long de la corde, au centre. Le contrôle actif sera assuré par des jets pulsés type vannes FESTO.

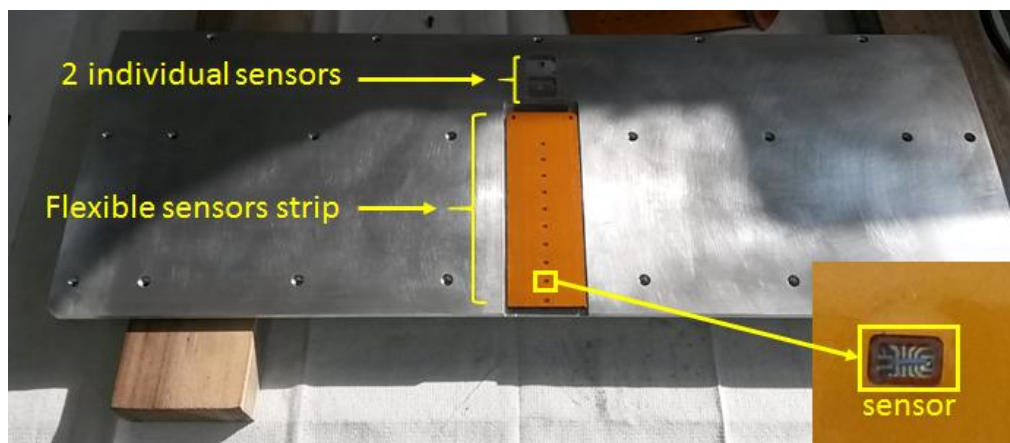


Figure 15. Maquette de volet en cours de préparation avec les 12 capteurs MEMS : deux sur supports individuels et 10 intégrés dans une bande flexible

## Remerciements

L'Agence Nationale de Recherche (ANR) a financé ce travail dans le cadre du projet ANR ASTRID "CAMELOTT". Le projet a également été soutenu par la plate-forme régionale CONTRAERO dans le cadre du CPER ELSAT 2020, cofinancé par l'Union Européenne, par l'Etat français et la Région des Hauts-de-France dans le cadre des Contrats Régionaux (CPER). Les auteurs remercient également RENATECH, le réseau français de nanofabrication et FEDER.

## References

- [1] M. Gad-el-Hak. Flow Control: The Future. *J. Aircr.* 38, 402–418 (2001).
- [2] L. Löfdahl, M. Gad-el-Hak MEMS-based pressure and shear stress sensors for turbulent flows *Meas. Sci. Technol.* 10, 665 (1999).
- [3] M. Sheplak, L. Cattafesta, T. Nishida, C. B. McGinley, MEMS shear stress sensors: promise and progress in 24th AIAA aerodynamic measurement technology testing conference. Florida Univ Gainesville mechanical and aerospace engineering (2004).
- [4] T. Chabert, J. Dandois, E. Garnier, Experimental closed-loop control of separated-flow over a plain flap using extremum seeking *Exp. Fluids* 57, (2016).

- 
- [5] J.T.W. Kuo, L. Yu, E. Meng, Micromachined Thermal Flow Sensors—A Review *Micromachines* 3, 550–573 (2012).
- [6] P. Pernod, V. Preobrazhensky, A. Merlen, O. Ducloux, A. Talbi, L. Gimeno, N. Tiercelin, J.F. Morrison, D.M. Birch, P. Lavoie, MEMS for Flow Control: Technological Facilities and MMMS Alternatives in IUTAM Symposium on Flow Control and MEMS, Springer Netherlands, 15–24 (2008).
- [7] A. Talbi, L. Gimeno, J.C. Gerbedoen, R. Viard, A. Soltani, V. Mortet, V. Preobrazhensky, A. Merlen, P. Pernod, A micro-scale hot wire anemometer based on low stress (Ni/W) multi-layers deposited on nano-crystalline diamond for airflow sensing. *J. Micromechanics Microengineering* 25, 125029 (2015).
- [8] J. J. Miao, T.S. Le, J.M. Yu, J.K. Tu, C.T. Wang, V. Lebiga, D. Mironov, A. Pak, V. Zinovyev, K.M. Chung, MEMS thermal film sensors for unsteady flow measurement. *Sens. Actuators Phys.* 235, 1–13 (2015).
- [9] C. Ghouila-Houri, J. Claudel, J.C. Gerbedoen, Q. Gallas, E. Garnier, A. Merlen, R. Viard, A. Talbi, P. Pernod, High temperature gradient micro-sensor for wall shear stress and flow direction measurements. *Appl. Phys. Lett.* 109, 241905 (2016).
- [10] R. Viard, A. Talbi, A. Merlen, P. Pernod, C. Frankiewicz, J.C. Gerbedoen, V. Preobrazhensky, A robust thermal microstructure for mass flow rate measurement in steady and unsteady flows. *J. Micromechanics Microengineering* 23, 65016 (2013).
- [11] R. Viard, A. Talbi, P. Pernod, A. Merlen, V. Preobrazhensky, Miniaturised Sensor Comprising A Heating Element, And Associated Production Method Patent FR2977886 (A1) 2013-01-18 WO2013008203 (A2) 2013-01-17 WO2013008203 (A3) 2013-03-07 CN103717526 (A) 2014-04-09 EP2731908 (A2) 2014-05-21 US2014157887 (A1) 2014-06-12 EP2731908 (B1) 2015-09-09 DK2731908 (T3) 2015-12-21. (2013).
- [12] H. Nagib, K.A. Chauchan, P.A. Monkewitz, Approach to an asymptotic state for zero pressure gradient turbulent boundary layers. *Philos. Trans. R. Soc.* 365, 755–770 (2007)
- [13] P. Rebuffet, *Aérodynamique expérimentale : Cours professé à l'Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique. Tome II*, Editions Dunod, (1966)