

# Mesure de la contrainte pariétale par film chaud dans un écoulement induit par un transducteur focalisé

Daniela GARCIA<sup>1,2</sup>, Cyril MAUGER<sup>1</sup>, César PLANTEVIN<sup>2</sup>, Antoine LOTTON<sup>1,2</sup>,  
Gabriel REGNAULT<sup>1</sup>, Emmanuel JONDEAU<sup>1</sup>, Claude INSERRA<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>INSA Lyon, CNRS, Ecole Centrale de Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, LMFA, UMR5509, 69621, Villeurbanne France

<sup>2</sup>Université Claude Bernard Lyon 1, Centre Léon Bérard, INSERM, LabTAU, F-69003 Lyon, France

Journées de la GI EIF, 2 et 3 juillet 2026

*Ce travail a bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre de France 2030 portant la référence ANR-21-SFRI-0001*

# Contexte

## Maladies et infections oculaires :

- Glaucome (~ 80 millions, collyres)
- Conjonctivite (~ 6 milliards/an, collyres)
- Sécheresse oculaire (~ 350 millions, collyres)
- Dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA) (~ 200 millions, injections intravitréennes)
- Uvéite (~ 2-3 millions, injections)
- Rétinopathie diabétique (~ 103 millions, injections intravitréennes)
- Endophtalmie (injections intravitréennes d'antibiotiques)

Traitements efficaces mais injections répétées nécessaires (toutes les 4 à 8 semaines)

➤ Charge importante (patients, système de santé)

Barrières biologiques (cornée, sclère, épithélium...)

➤ < 5 % d'un collyre

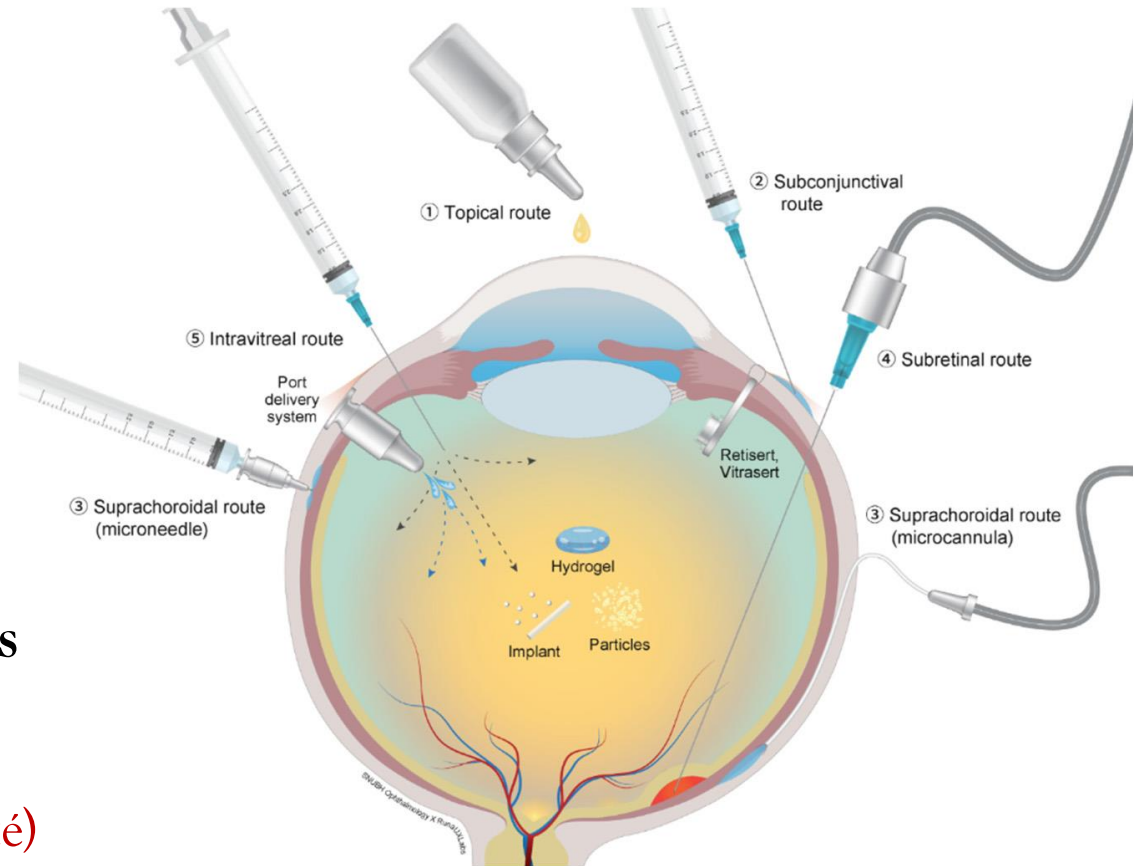
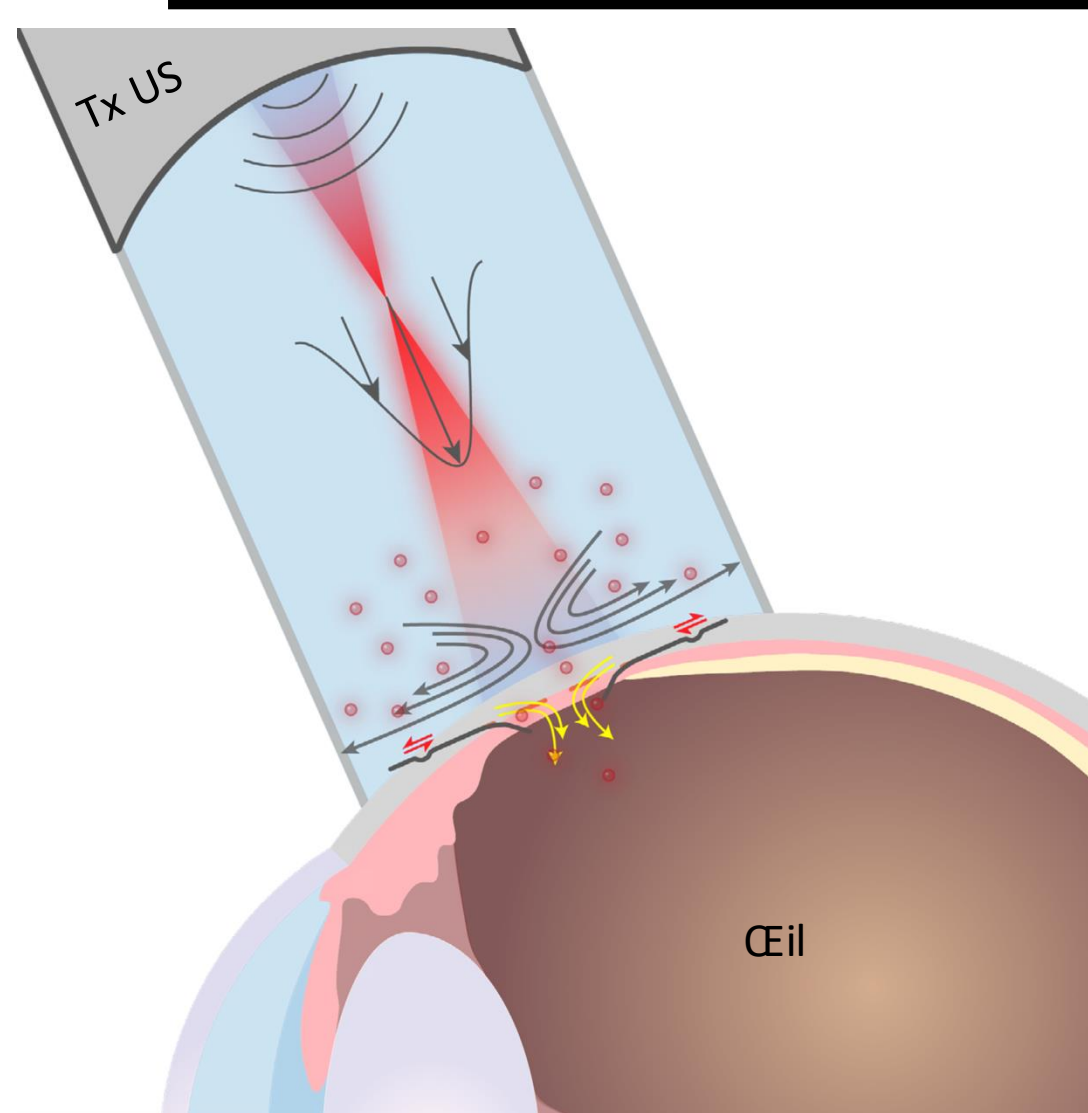


Schéma de différentes voies d'administration de médicaments oculaires.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kim, H. M., & Woo, S. J. (2021). Ocular drug delivery to the retina: current innovations and future perspectives. *Pharmaceutics*, 13(1), 108.

# Contexte (thèse César PLANTEVIN, LabTAU-EyeTakeCare)



Objectif : perméabiliser l'œil afin d'internaliser de manière efficace des médicaments adaptés aux maladies et infections affectant l'œil.

Méthode : Générer un écoulement (Eckart streaming<sup>2</sup>) externe pour induire une contrainte mécanique à la surface de l'œil et former des micro-pores dans le tissu.

Outil : transducteur cylindrique focalisé à 21 MHz.

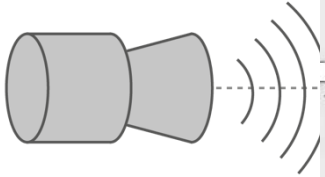
- le transducteur US induit un écoulement
- l'écoulement induit des contraintes pariétales

<sup>2</sup>Eckart, C. (1948). Vortices and streams caused by sound waves. *Physical review*, 73(1), 68.

# Contexte (thèse César PLANTEVIN, LabTAU-EyeTakeCare)

---

Transducer



1 cm

# OBJECTIFS

Mise en place d'un **banc experimental** pour quantifier la contrainte pariétale (WSS) générée par un transducteur (US)

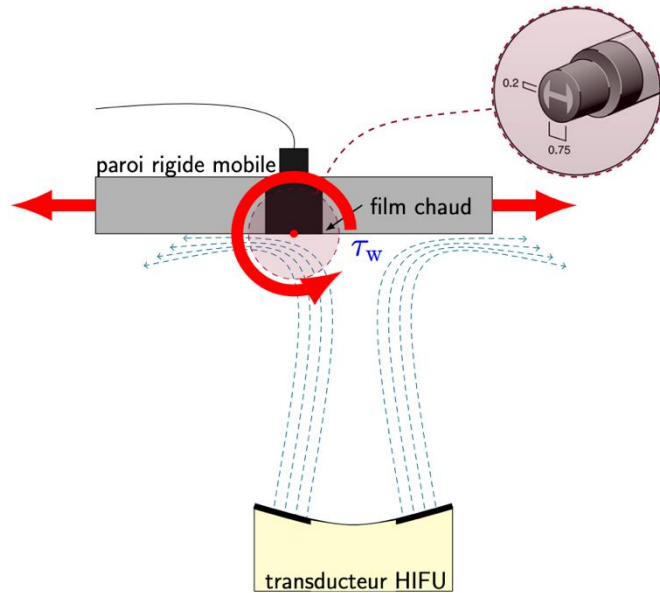


Fig. Schéma expérimental (vue du dessus)

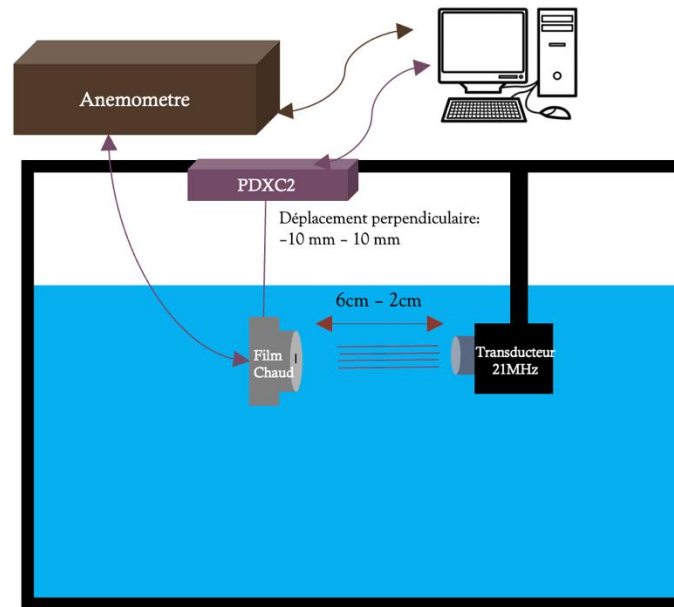


Fig. Schéma expérimental

**Anémomètre** : Permet de mesurer localement la WSS par loi de King (reliant la tension électrique à la vitesse).

**Prise en main de la sonde**

- Fonctionnement de la sonde
- Etalonnage
- Mesure

# FONCTIONNEMENT DE LA SONDE

Capteur chauffé électriquement qui se refroidit par la convection du fluide environnant

**Pont de Wheatstone :** Surveille et corrige en continu les changements de résistance causés par le refroidissement

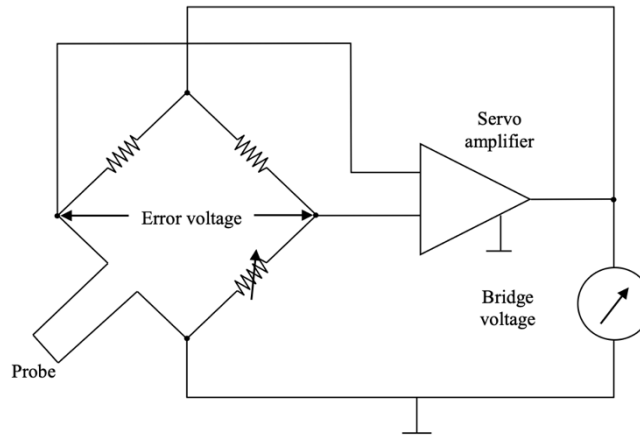
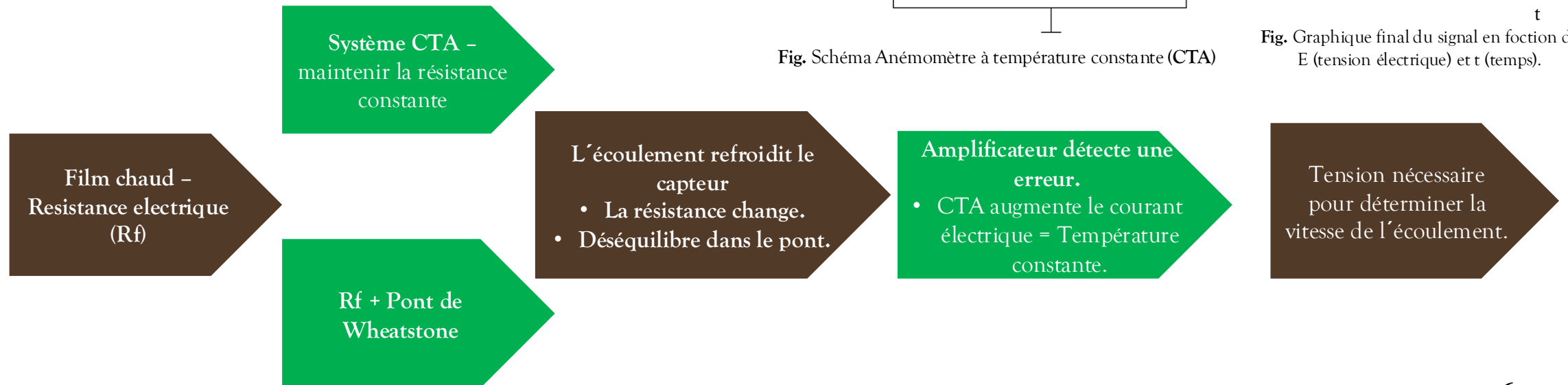


Fig. Schéma Anémomètre à température constante (CTA)

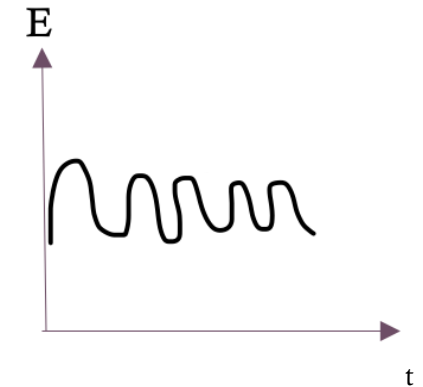


Fig. Graphique final du signal en fonction de E (tension électrique) et t (temps).

<sup>4</sup>A. S. Tomar, S. Perzanowski, R. Mejia-Alvarez, R. Mukherjee, A. M. Hellum y K. M. Kamensky, "Wall Shear Stress Generated by a Bernoulli Pad: Hot-Film Anemometry and Model Testing", Apr. 23, 2024.  
<sup>5</sup>Madavan, N. & Deutsch, S. & Merkle, C.. (1985). Measurements of Local Skin Friction in a Microbubble Modified Turbulent Boundary Layer. Journal of Fluid Mechanics. 156. 237-256.  
 10.1017/S0022112085002075

---

# LA LOI DE KING

Permet de relier la puissance électrique nécessaire pour maintenir le film chaud à température constante à la contrainte pariétale

$$E^2 = A + B\tau^n$$

Équation de la loi de King

**A** et **B** constantes de calibration

$\tau$ = contrainte de cisaillement (à déterminer théoriquement)

**n**= 1/3 exposant classiquement observé pour les capteurs film chaud

**E**= Tension électrique

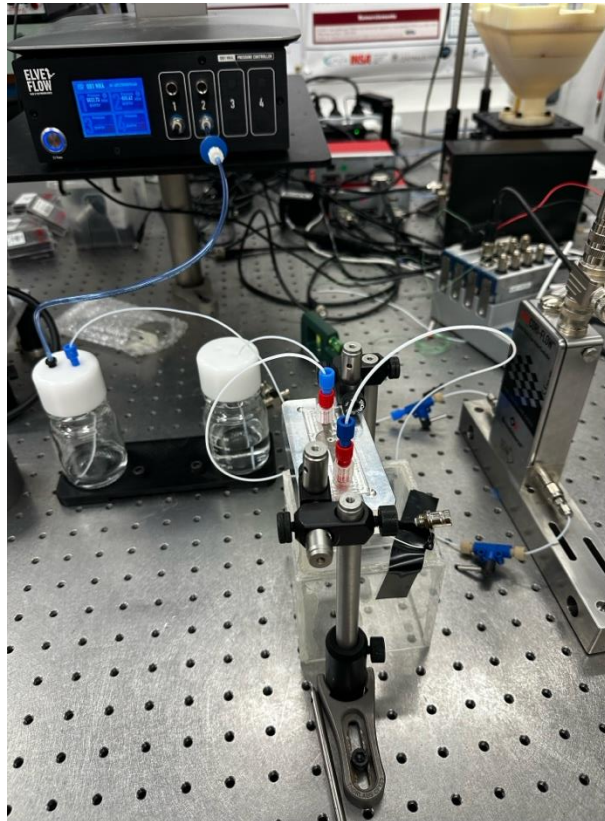
Les  $\tau$  utilisées pour l'étalonnage ont été calculées à partir des équations de **Navier-Stokes**

Sous hypothèse **d'écoulement laminaire** pleinement développé dans un **microcanal rectangulaire**

<sup>4</sup>A. S. Tomar, S. Perzanowski, R. Mejia-Alvarez, R. Mukherjee, A. M. Hellum y K. M. Kamensky, "Wall Shear Stress Generated by a Bernoulli Pad: Hot-Film Anemometry and Model Testing", Apr. 23, 2024.

<sup>6</sup>L.V. King (1914) "On the convection of heat from small cylinders in a stream of fluid: determination of the convection constants of small platinum wires with application to hot-wire anemometry," Phil. Trans. Roy. Soc., Ser. A., Vol. 214, pp. 373-432.

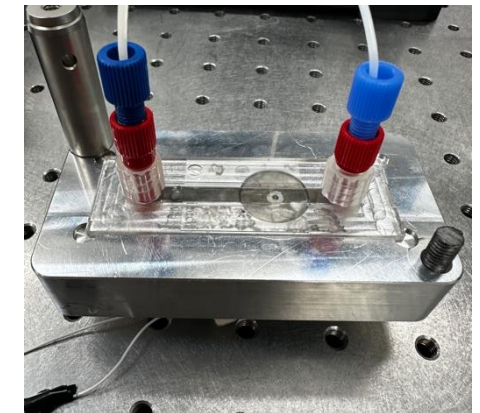
# CALIBRATION DU SYSTÈME



- + Contrôleur de pression ElveFlow  
Séquence avec différentes valeurs de pression :  
2000 à 10 mbar + trigger
- + Débitmètre BRONKHORST Mini Cori Flow - BFS  
Contrôle simultané du débit et de la pression avec Elveflow.

Microcanal Sticky-Slide  $10^4$  Luer  
Hauteur : 450  $\mu\text{m}$

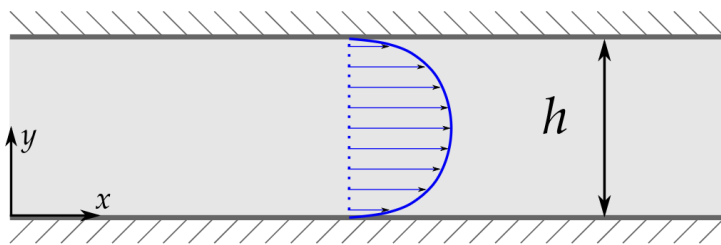
- + Film chaud + Anémomètre  
- TSI1268W  
Positionnement : ajusté à la paroi et perpendiculaire à la direction de l'écoulement.



# COMMENT MESURE LA CONTRAINTE PARIÉTALE DANS UN CANAL ?

## ÉCOULEMENT DE POISEUILLE – NAVIER STOKES

### Écoulement de Poiseuille



### Navier Stokes

#### Profil de vitesse

$$U = -\frac{G}{2\mu}y(h-y)$$

$$U = \frac{Qv}{S} = \frac{Qv}{hw}$$

#### Contrainte de cisaillement

$$\tau = \frac{6\mu Qv}{h^2w}$$

$\tau$  est liée au gradient de vitesse au voisinage d'une surface :  $\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y}$

Équation de continuité pour un écoulement incompressible :

$$\text{div } \vec{u} = 0$$

Équation de quantité de mouvement :

$$\rho \frac{d\vec{u}}{dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} + \rho \vec{f}$$

$G$  = gradient de pression

$h$  = hauteur du canal

$w$  = largeur du canal

$L$  = longueur du canal

$Qv$  = débit volumique

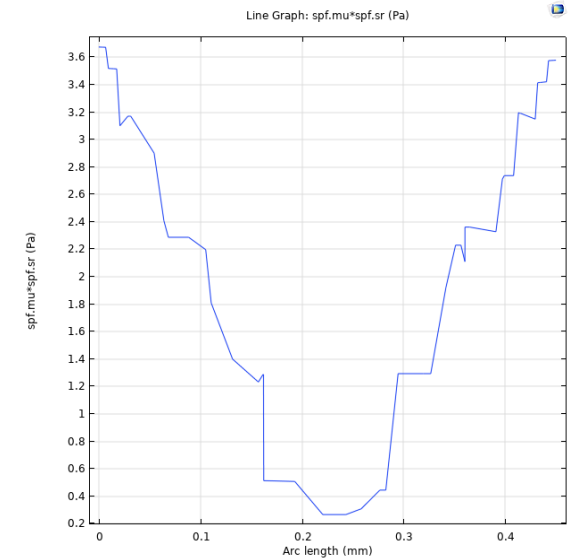
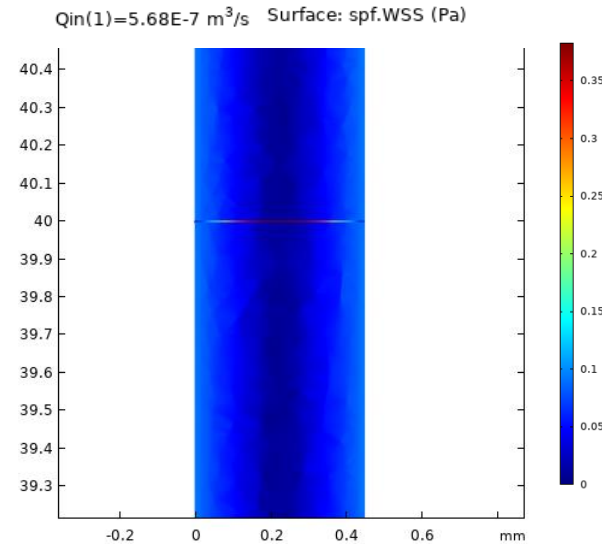
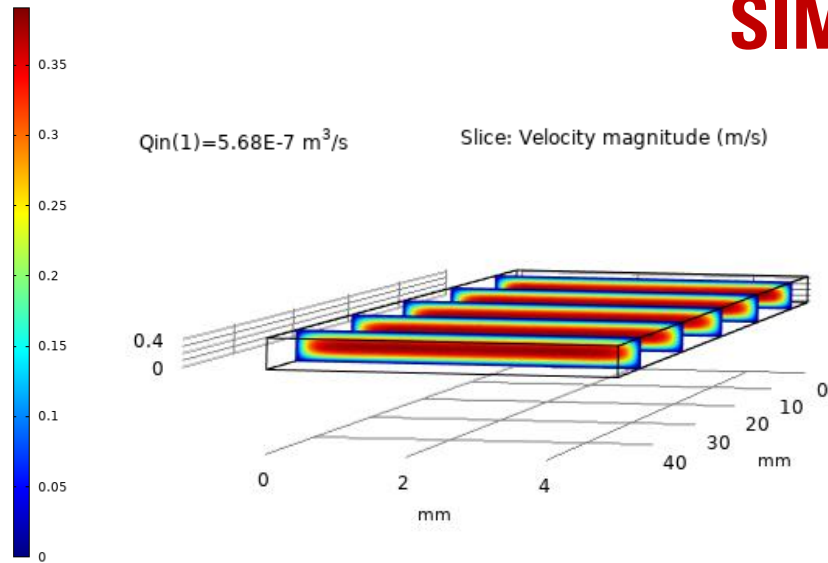
$U$  = vitesse

$\tau$  = contrainte de cisaillement

$\mu$  = viscosité

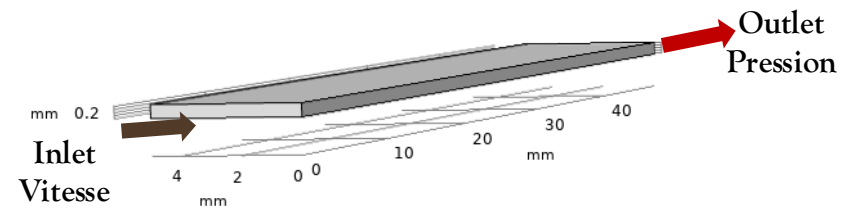
$y$  = position verticale dans le canal ( $y = 0$  à la paroi de référence)

# SIMULATION COSMOL



## Paramètres

- Ecoulement laminaire
- Stationnaire
- Maillage: Extra fine
- Conditions initiales [5.68e-07 - 2.52e-09]



# FORMULE FRABICANT DU MICROCANAL

$$\tau = \eta * k * \phi$$

$\eta$ = Viscosité dynamique (dyn\*s/cm<sup>2</sup>)

k= 104.7 (par Ibidi, selon le modèle de canal.)

$\phi$ = Débit (mL/min)

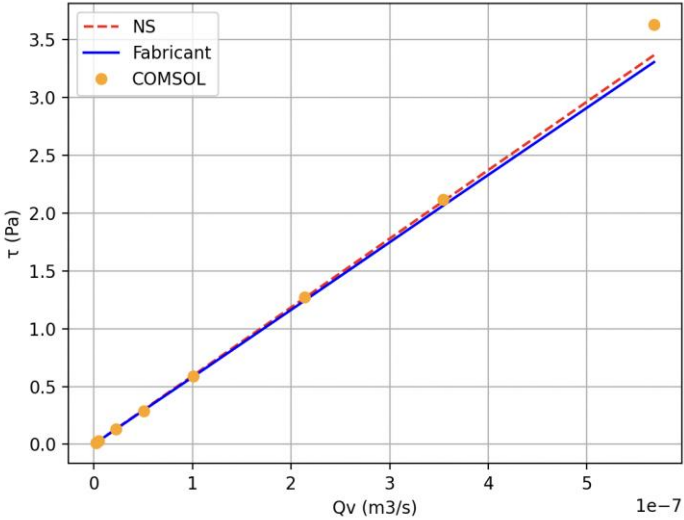
$$\tau = f(\Delta P) = f(Q_v)$$

$$\tau = \frac{6\mu Q_v}{h^2 w}$$

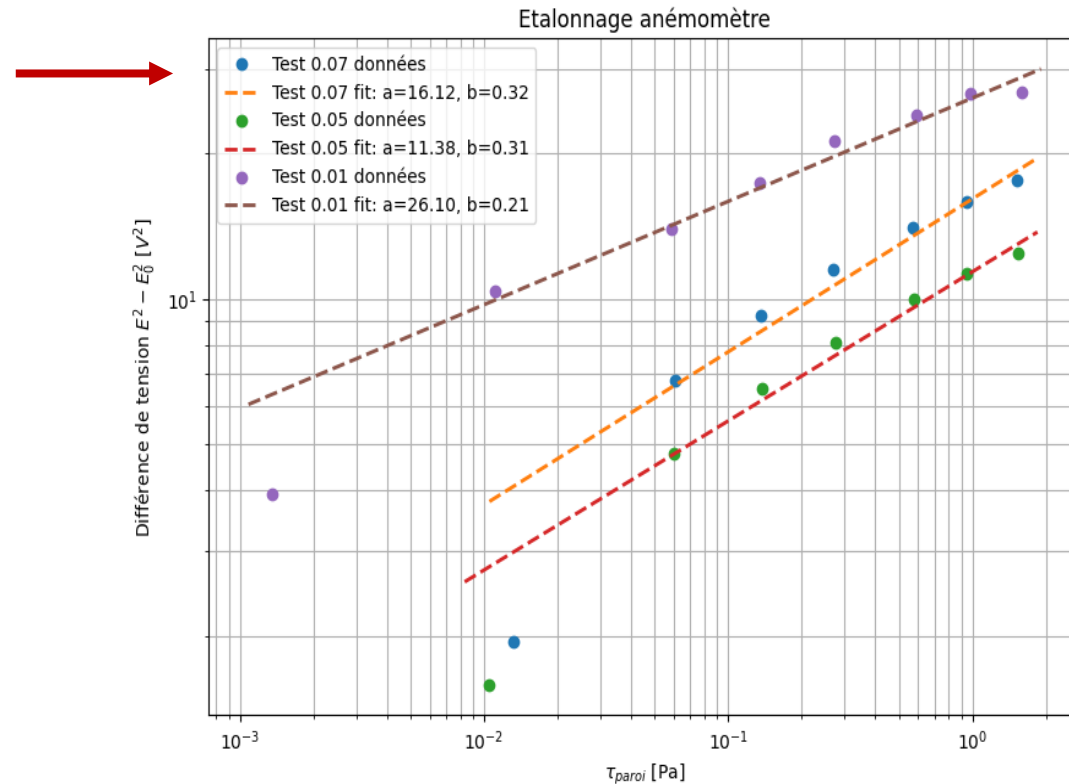
Selon les équations de Navier–Stokes:

- $\tau$  dépend du  $Q_v$
- Distribution de la  $\tau$  en fonction de la hauteur du canal.

## COMPARAISON



# COURBES DE CALIBRATION



Rappel : Loi de king

$$E^2 = A + B\tau^n$$

A et B constant de calibration

$\tau$  = Contrainte de cisaillement (à déterminer théoriquement)

$n = 1/3$  exposant classiquement observé pour les capteurs film chaud

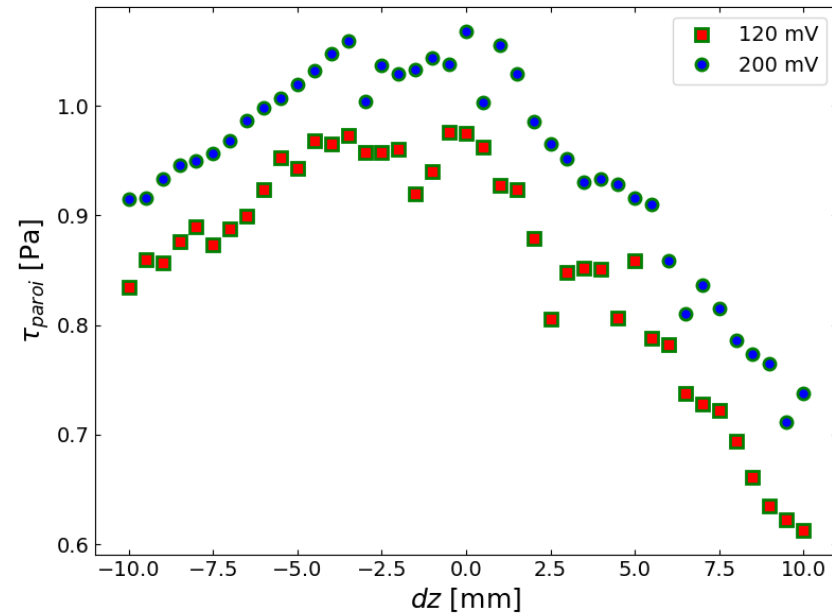
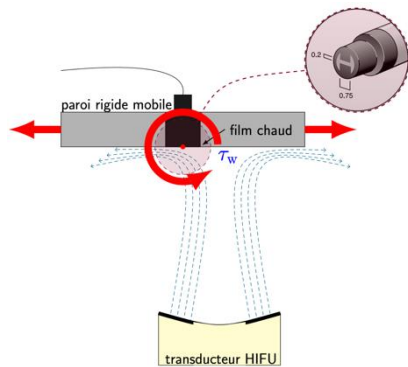
E = Tension électrique

Fig. Etalonnage complet pour trois coefficients de surchauffe différents (0,07 en orange, 0,05 en rouge, 0,01 en marron).

# OBJECTIFS FUTURS

- ✓ Quantifier la  $\tau$  généré par un transducteur ultrasonore focalisé avec différents paramètres.

Transducteur a 21Mhz



- ✓ En conditions normales, la  $\tau$  dans les veines varie (selon la région, la géométrie et la composition)

Généralement, dans les microveines  $\tau = 10 \text{ dyn/cm}^2 (\approx 1 \text{ Pa})$

# Mesure de la contrainte pariétale par film chaud dans un écoulement induit par un transducteur focalisé

Daniela GARCIA<sup>1,2</sup>, Cyril MAUGER<sup>1</sup>, César PLANTEVIN<sup>2</sup>, Antoine LOTTON<sup>1,2</sup>,  
Gabriel REGNAULT<sup>1</sup>, Emmanuel JONDEAU<sup>1</sup>, Claude INSERRA<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>INSA Lyon, CNRS, Ecole Centrale de Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, LMFA, UMR5509, 69621, Villeurbanne France

<sup>2</sup>Université Claude Bernard Lyon 1, Centre Léon Bérard, INSERM, LabTAU, F-69003 Lyon, France

Journées de la GI EIF, 2 et 3 juillet 2026