

# Amélioration des mesures de haut flux

Jean-Laurent Gardarein (TREFLE)

Stefan Löhle (TREFLE)

Jean-Luc Battaglia (TREFLE)

Alain Ochsenhofer (TREFLE)

Jean-Christophe Batsale (TREFLE)

Dominique Conte (EADS)

Pierre Jullien (EADS)

Bruno van Ootegem (EADS)

Jacques Couzi (CEA)

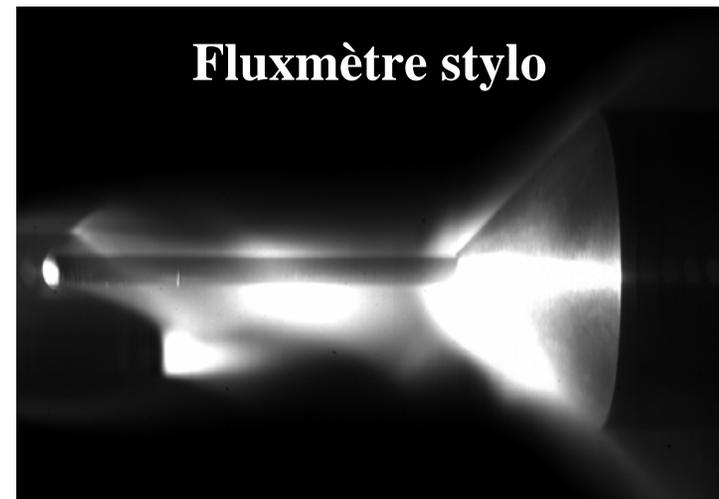
Jean-Pierre Lasserre (CEA)



**Torche à plasma**

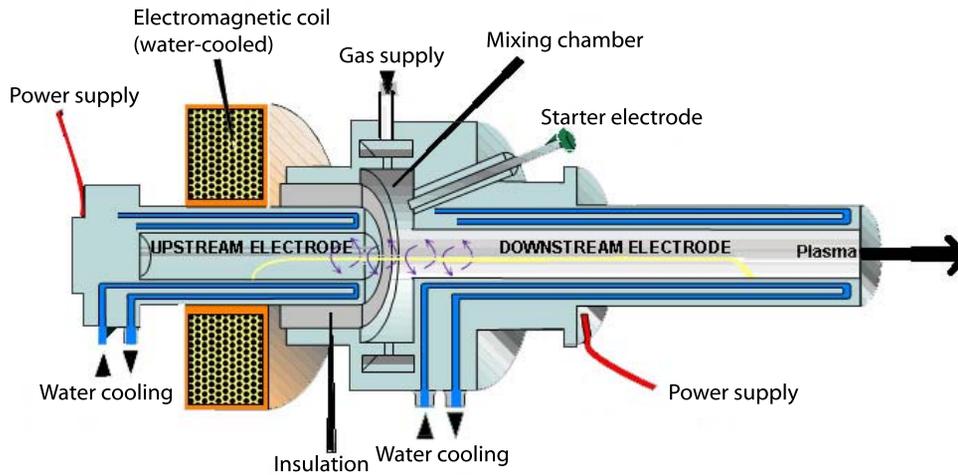


**Fluxmètre stylo**



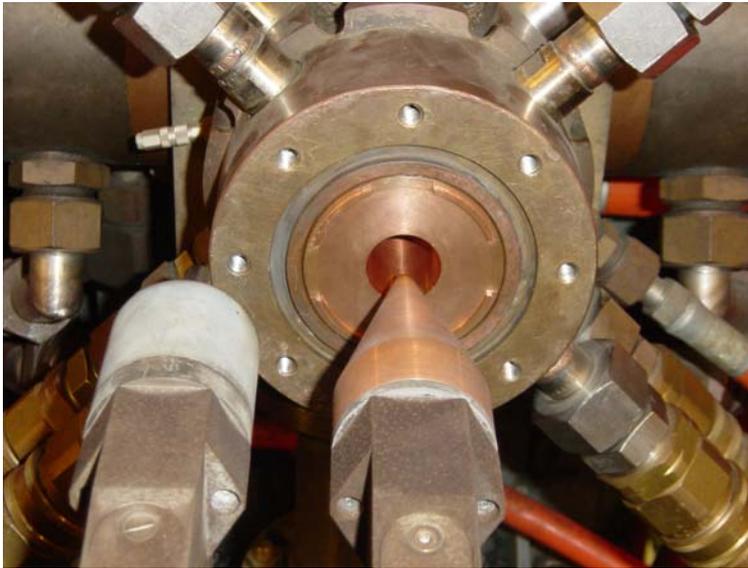
# **Introduction**

# Simulation d'entrées atmosphériques



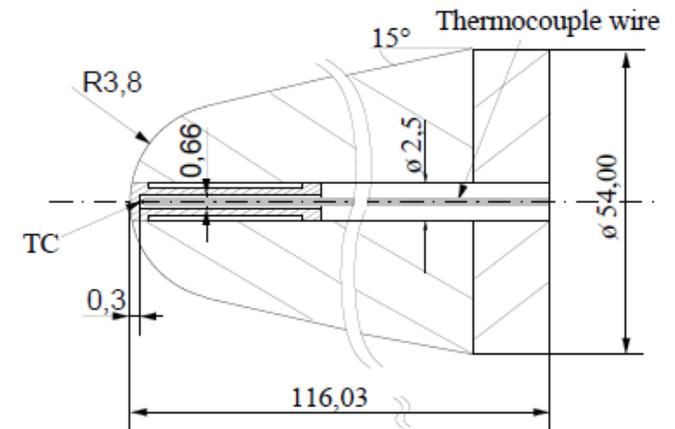
## Torche à plasma :

- $p_{tot} \approx 60 \text{ bar}$  ( $6 \cdot 10^6 \text{ Pa}$ )
- Flux jusqu'à  $80 \text{ MW/m}^2$
- Passage dans la torche = 30-50ms



**Comment caractériser le flux dans la torche ?**

# Utilisation de fluxmètres

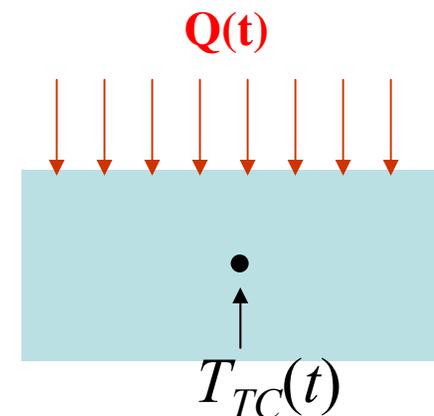


- TC soudé proche de la surface du fluxmètre
- Mesure de température en profondeur
- Calcul du flux à partir de cette mesure de T
- **Caractérisation thermique du fluxmètre**

Calcul de sa réponse impulsionnelle au niveau du TC  $\Rightarrow h(t)$

Calcul du flux possible par différentes méthodes  
(déconvolution+régularisation, pas de temps futurs...)

**Comment caractériser le fluxmètre ?**



# Quelle méthode pour caractériser le fluxmètre

## La méthode du constructeur : Le modèle semi-infini

- Pas de prise en compte de la géométrie

- Hypothèse du mur semi-infini valable sur un temps très court

$$T(t) = \frac{\varphi}{\sqrt{k \rho C_p}} \left[ 2 \sqrt{\frac{t}{\pi}} e^{-\frac{x_0^2}{4at}} - \frac{x_0}{\sqrt{a}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x_0}{\sqrt{4at}}\right) \right]$$

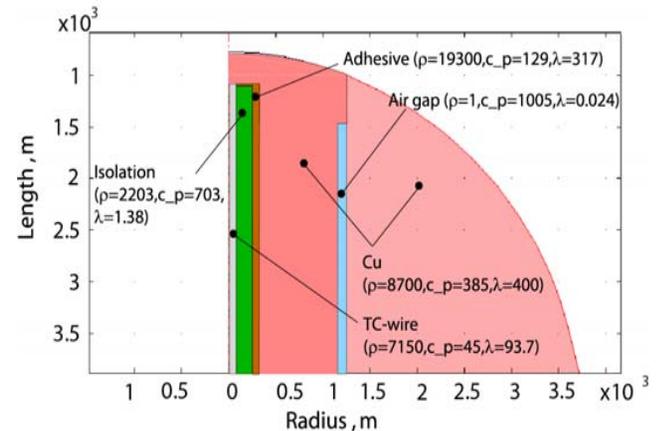
## La méthode numérique : la modélisation par éléments finis

- Modélisation du fluxmètre complexe

- Difficulté de connaître la géométrie exacte

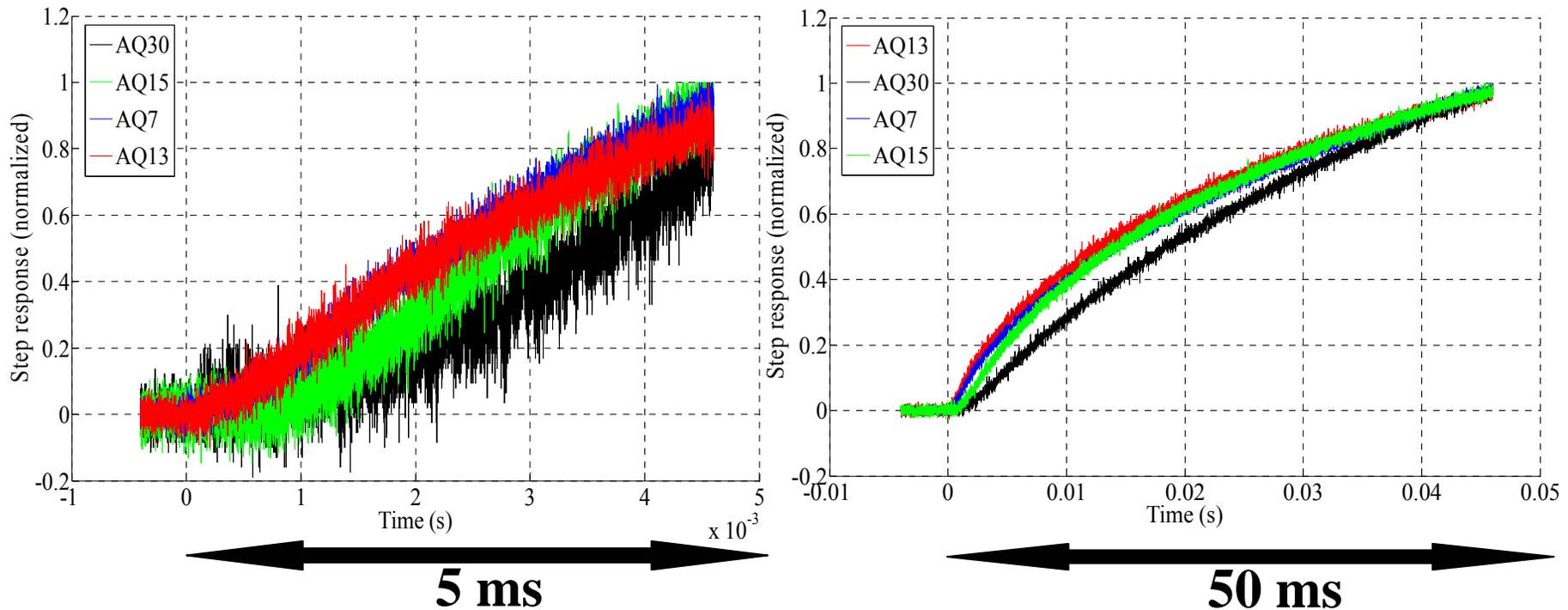
- Difficulté de modéliser la qualité du contact TC

- Difficulté de connaître avec précision la position du TC



# Tous les fluxmètres sont différents...

- Qualité de la soudure du TC
- Position du TC dans la profondeur du fluxmètre (paramètre très sensible)
- Géométrie pas toujours parfaite...
- Temps de réponse des TC



- Impossible de réaliser une modélisation numérique acceptable pour tous les fluxmètres
- Obligation de réaliser un étalonnage de chaque fluxmètre en laboratoire

# **PLAN**

## **Etalonnage et incertitudes**

**Calibration en laboratoire**

**Principe de la méthode NISI**

**Incertitudes sur les paramètres du modèle non entier**

**Incertitudes sur le flux absorbé par le fluxmètre**

## **Fluxmètre stylo**

**Conception et réalisation**

**Avancées technologiques**

**Résultats expérimentaux**

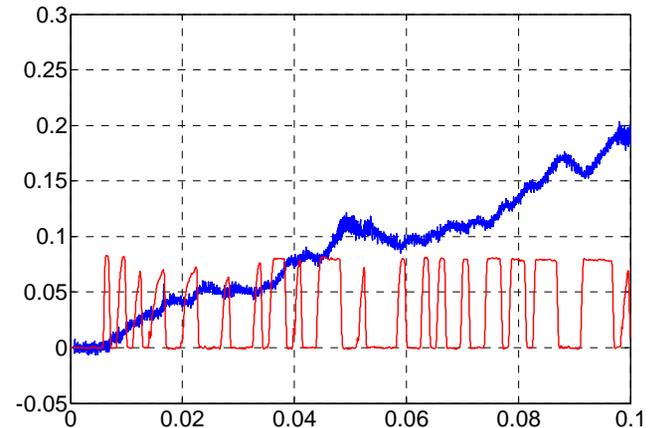
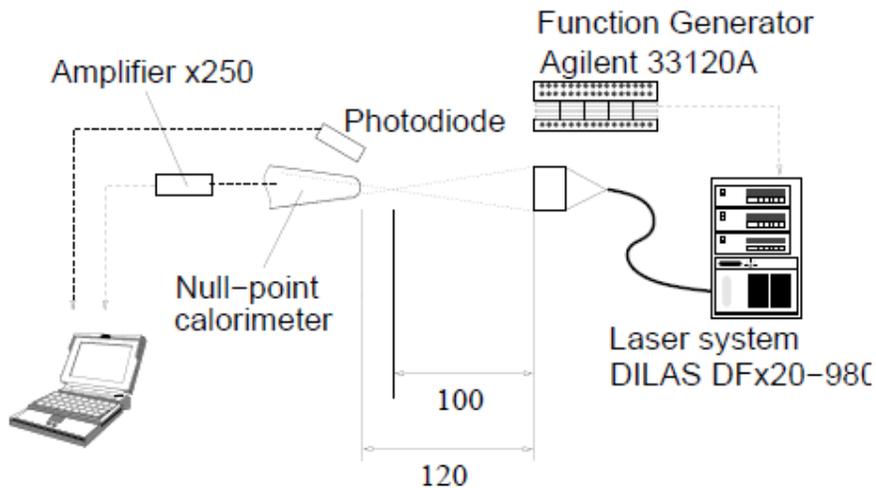
**Gros bémol**

## **Conclusions et perspectives**

# **Etalonnage et incertitudes**

# Calibration en laboratoire

- Utilisation d'un laser : Flux envoyé connu (mesuré avec un fluxmètre CN)
- Emissivité du fluxmètre mesurée par ailleurs (CEA/CESTA)
- Température mesurée au niveau du TC



- Difficulté de réaliser une excitation impulsionnelle expérimentale (reproductible)
- Réponse indicielle possible mais ne caractérise pas le fluxmètre aux temps court

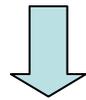
**=> Excitation avec une séquence pseudo aléatoire (PRBS)**

# Principe de la méthode NISI (Non Integer System Identification)

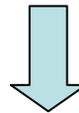
=> Expression dans un cas simple : Milieu semi-infini

Dans Laplace...

$$\theta(p) = \frac{\psi(p)}{\sqrt{k \rho C_p} \sqrt{p}} e^{-\sqrt{\frac{p}{a}} x_0}, \quad p = j\omega$$
$$e^{-\sqrt{\frac{p}{a}} x_0} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\left(-\sqrt{\frac{p}{a}} x_0\right)^n}{n!} = 1 - \frac{x_0}{\sqrt{a}} \sqrt{p} + \frac{x_0^2}{2a} p - \frac{x_0^3}{6a^{3/2}} p^{3/2} + \dots$$



$$\sqrt{k \rho C_p} \sqrt{p} \theta(p) = \left( 1 - \frac{x_0}{\sqrt{a}} \sqrt{p} + \frac{x_0^2}{2a} p - \frac{x_0^3}{6a^{3/2}} p^{3/2} + \dots \right) \psi(p)$$



Transformée de Laplace inverse

$$\sqrt{k \rho C_p} \frac{d^{1/2} T(t)}{dt^{1/2}} = \varphi(t) - \frac{x_0}{\sqrt{a}} \frac{d^{1/2} \varphi(t)}{dt^{1/2}} + \frac{x_0^2}{2a} \frac{d \varphi(t)}{dt} - \frac{x_0^3}{6a^{3/2}} \frac{d^{3/2} \varphi(t)}{dt^{3/2}} + \dots$$

Comment faire dans un cas 3D avec géométrie complexe, temps de réponse des TC.....

On peut montrer que tout système linéaire peut être caractériser par des paramètres  $\alpha_n$  et  $\beta_n$  qui vérifient :

$$\sum_{n=M_0}^M \alpha_n D^{n/2} V(t) = \sum_{n=L_0}^L \beta_n D^{n/2} \varphi(t)$$

Combien de coefficients  $\alpha$  et  $\beta$  faut il prendre pour décrire le comportement du capteur ?

Quels sont les ordres de dérivation qu'il faut choisir ?

Quelle est l'influence du bruit de mesure sur le calcul de la réponse impulsionnelle du capteur (et donc du flux) ?

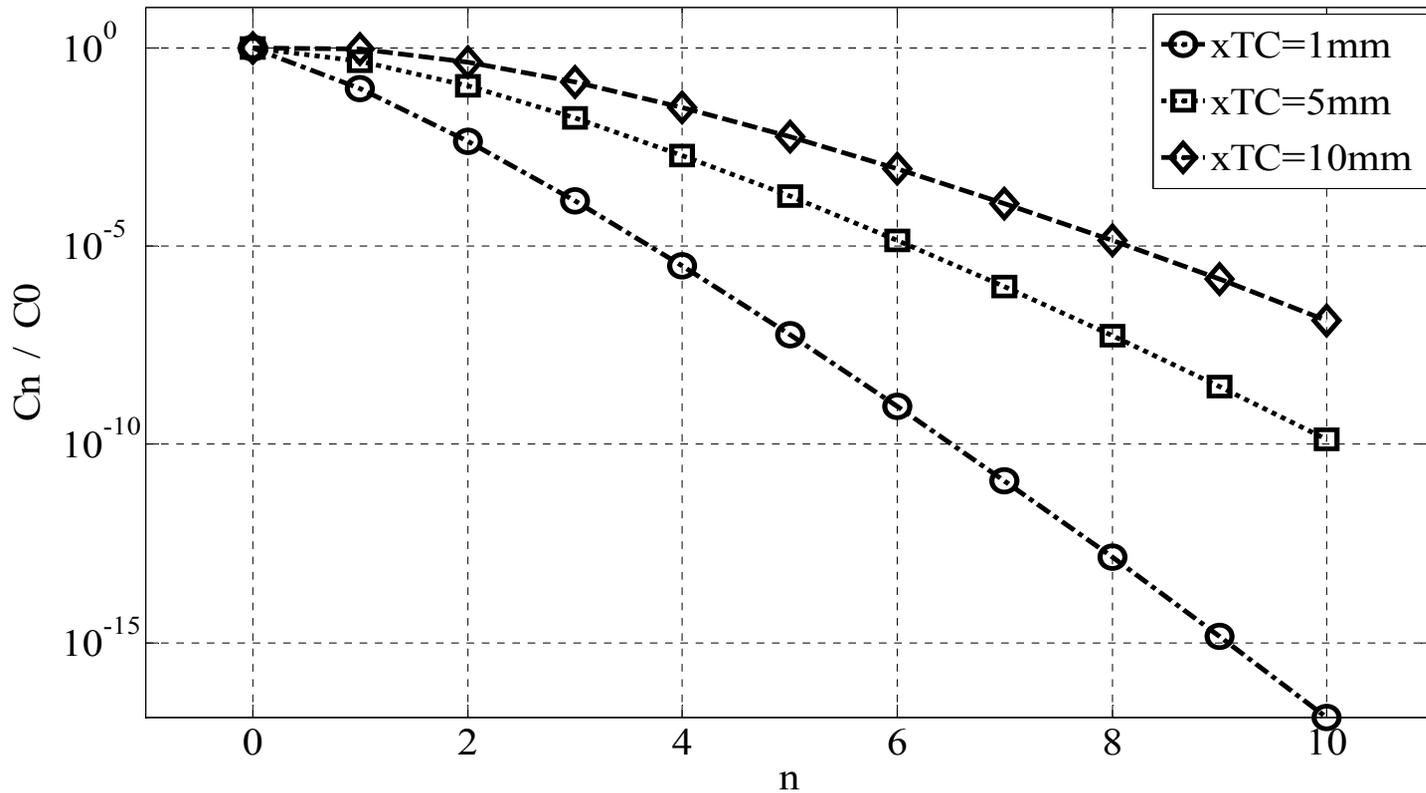
**Engendre une incertitude sur les paramètres estimés du capteur**

Avec quelle précision est-on capable de déterminer le flux absorbé par le capteur ?

# Incertitudes sur les paramètres estimés

## Nombre de paramètres à estimer

- Indications avec le calcul de coefficients dans le cas du modèle du mur semi-infini
- Mais aussi l'expérience...

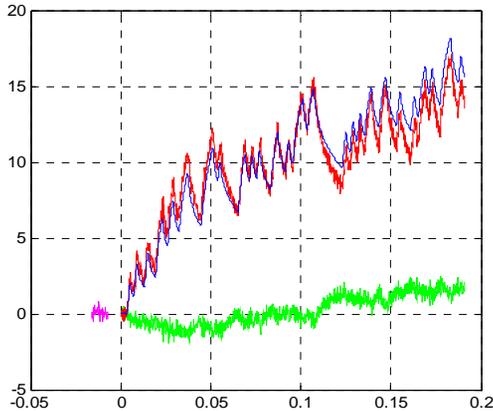


## Choix des ordres de dérivation

- Rapidité des calculs permet de faire un balayage des ordres
- L'analyse des résidus permet de choisir les ordres permettant la meilleure estimation

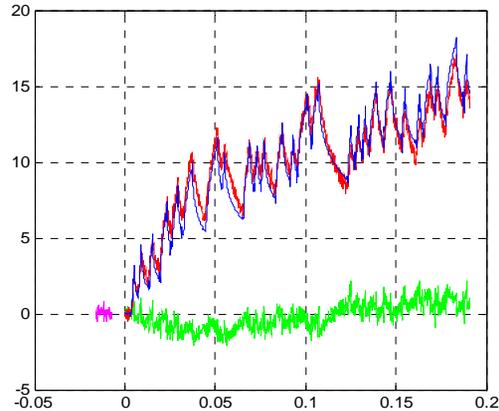
$$n_0 = [0 \ 0.5 \ 1 \ 1.5 \ 2]$$

$$d_0 = [0.5 \ 1 \ 1.5]$$



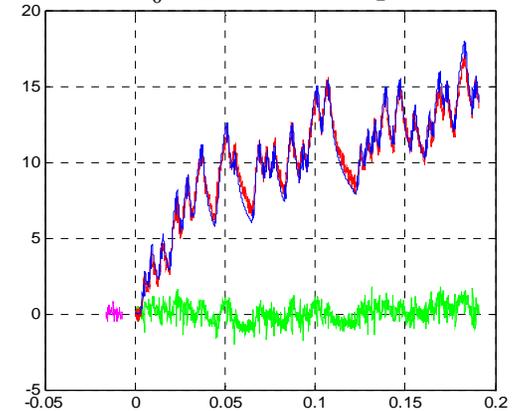
$$n_0 = [-0.5 \ 0 \ 0.5 \ 1 \ 1.5]$$

$$d_0 = [0 \ 0.5 \ 1]$$



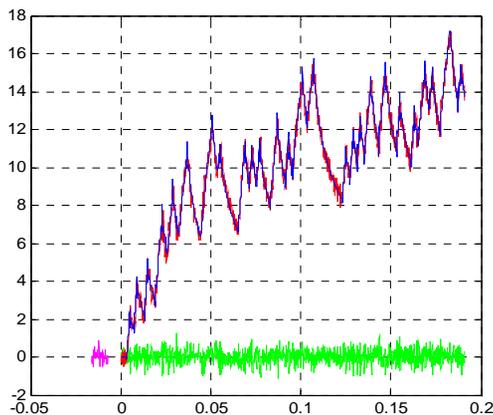
$$n_0 = [-1 \ -0.5 \ 0 \ 0.5 \ 1]$$

$$d_0 = [-0.5 \ 0 \ 0.5]$$



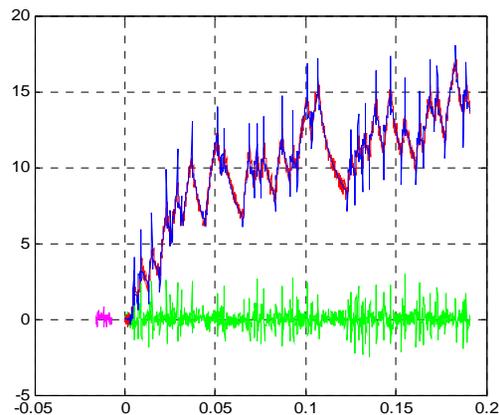
$$n_0 = [-1.5 \ -1 \ -0.5 \ 0 \ 0.5]$$

$$d_0 = [-1 \ -0.5 \ 0]$$



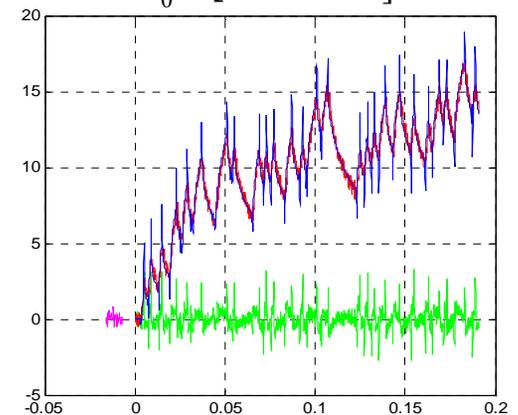
$$n_0 = [-2 \ -1.5 \ -1 \ -0.5 \ 0]$$

$$d_0 = [-1.5 \ -1 \ -0.5]$$

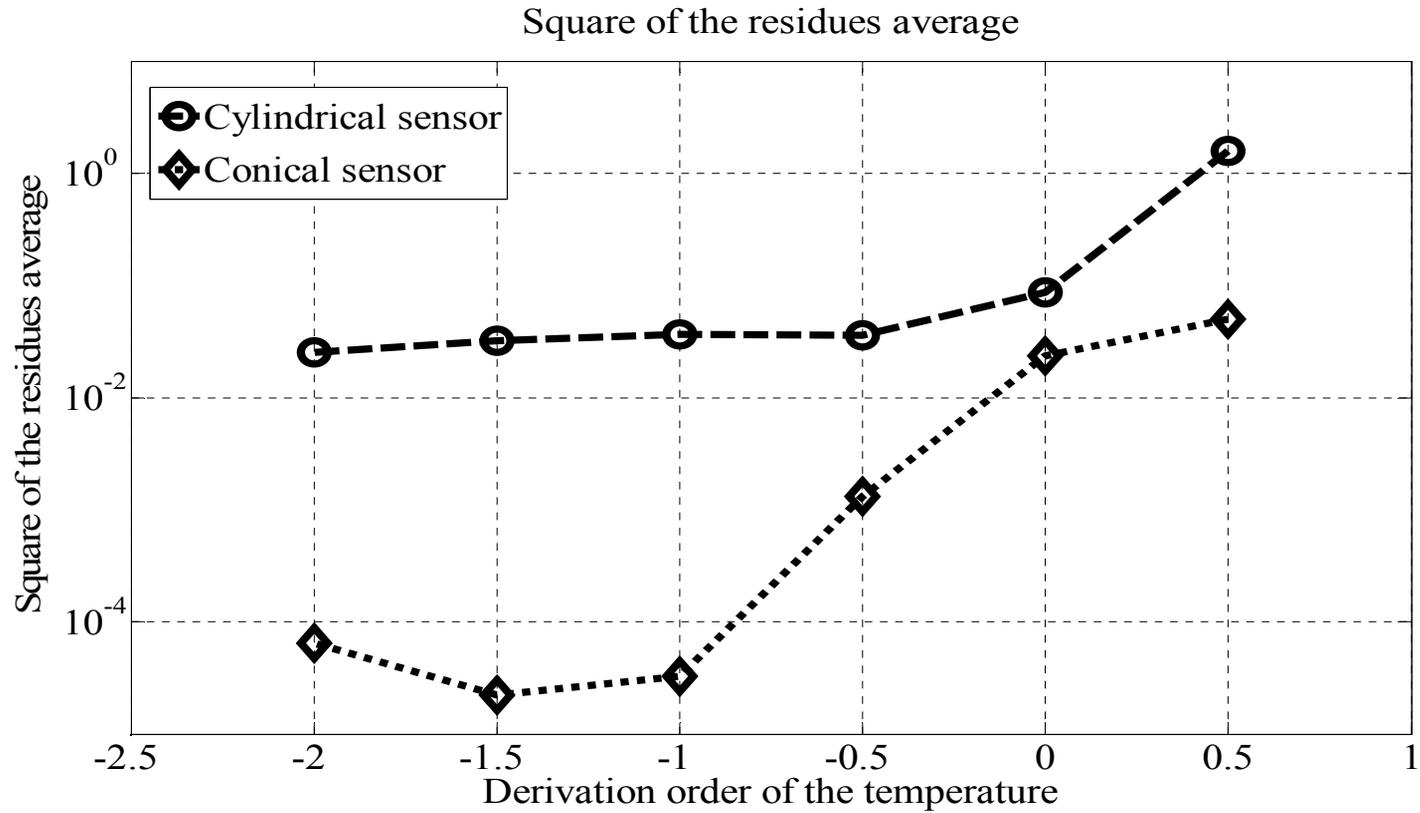


$$n_0 = [-2.5 \ -2 \ -1.5 \ -1 \ -0.5]$$

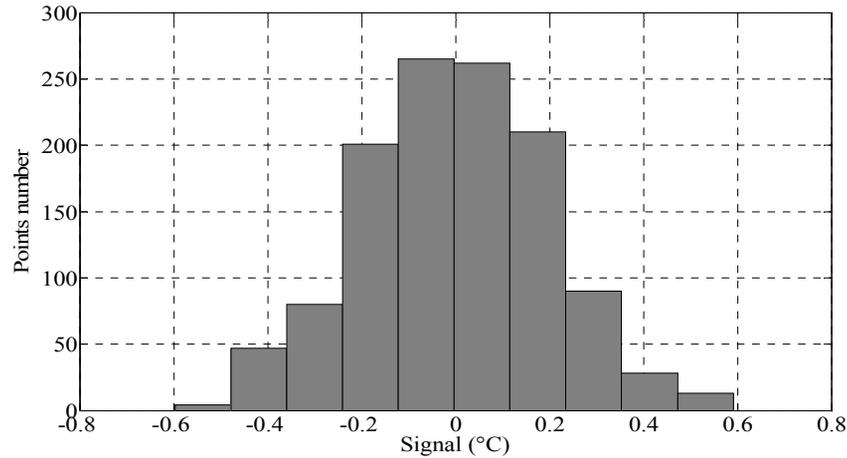
$$d_0 = [-2 \ -1.5 \ -1]$$



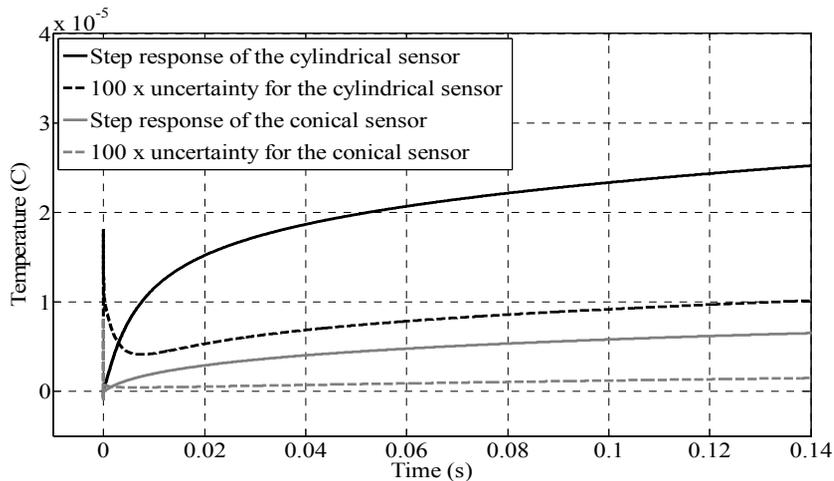
# Analyse des résidus et conséquence sur le calcul de la réponse indicielle :



- Analyse du bruit de mesure : Bruit Gaussien => permet d'utiliser les moindres carrés récursifs pour les estimations



### Incertitudes sur la réponse indicielle calculée :



**L'incertitude sur la réponse indicielle calculée due à l'estimation est de l'ordre de 1%**

• Incertitude sur le flux absorbé par le fluxmètre

Négligeable

$$\varphi(t) = \frac{(1 - \rho(\lambda_{las}))\phi(t) - \varepsilon(\lambda_{IR})\sigma(T_s(t)^4 - T_{al}^4)}{\pi R^2}$$

$$\varphi(t) = \frac{(1 - \rho(\lambda_{las}))\phi(t)}{\pi R^2}$$

$$\frac{\Delta\varphi}{\varphi} = \frac{\Delta\varepsilon(\lambda_{las})}{\varepsilon(\lambda_{las})} + \frac{\Delta\phi}{\phi} + 2\frac{\Delta R}{R}$$

Erreur sur la taille du faisceau de 5%

Mesure CEA

Incertitude de 6%

Mesure tête CN 200W

Incertitude constructeur de 1%

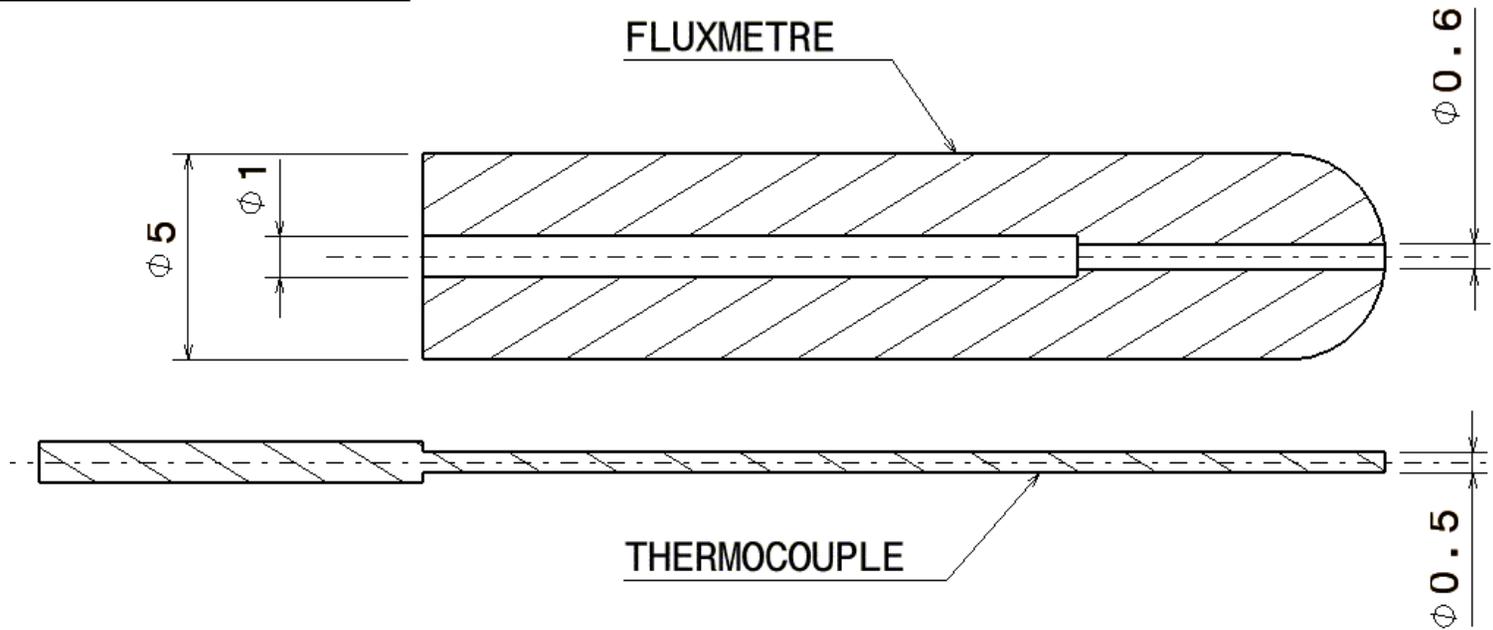
**Au total : 17% !**

**Bilan sur les incertitudes :** 1% lié à l'estimation

17% liés à la détermination du flux absorbé

**Fluxmètre stylo**

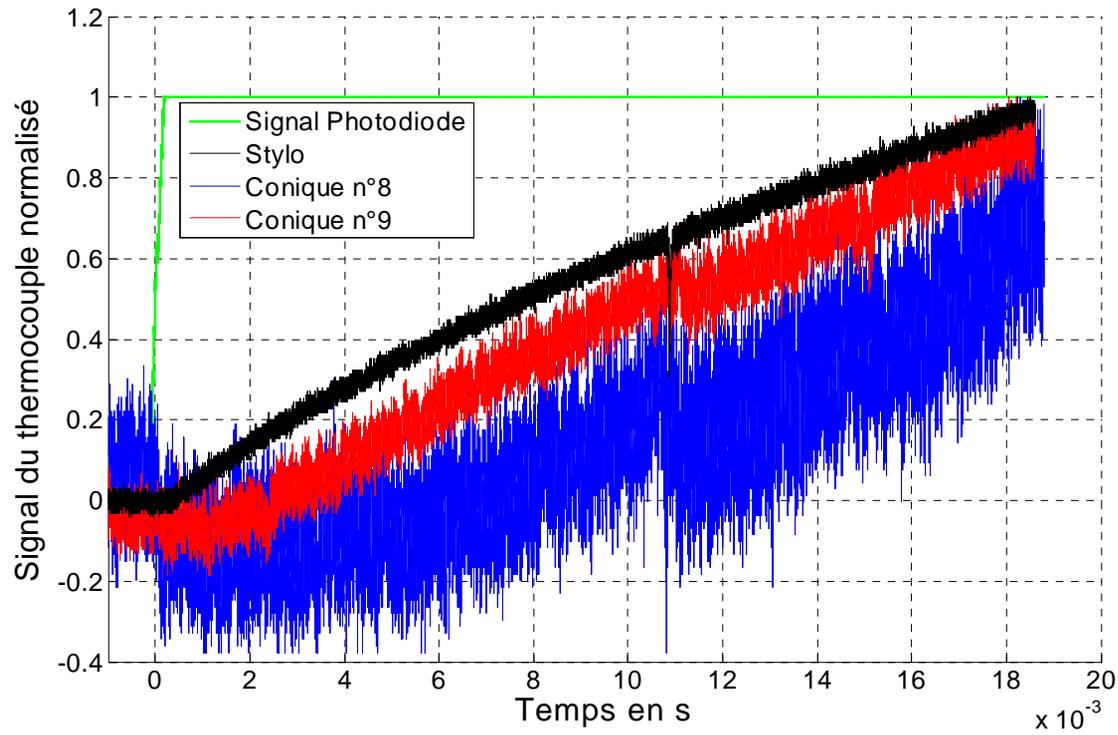
## Conception et réalisation



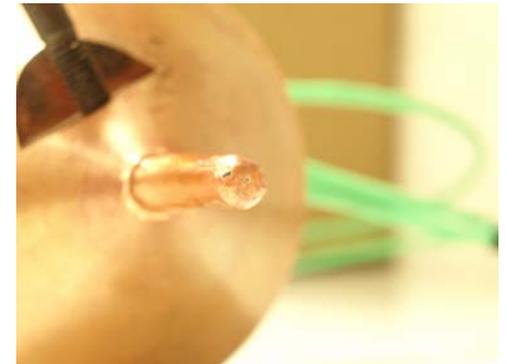
- Mesure du temps de réponse du TC avant son placement
- Stylo en cuivre percé dans toute sa longueur
- Sertissage du TC au bout du stylo avec un outil conçu à l'atelier
- Mesure du temps de réponse du fluxmètre avec photodiode et laser
- Rectification pointe du fluxmètre jusqu'à obtention d'un faible temps de réponse

**Réalisation** avec A. Ochsenhofer, Technicien TREFLE

## Avancées technologiques

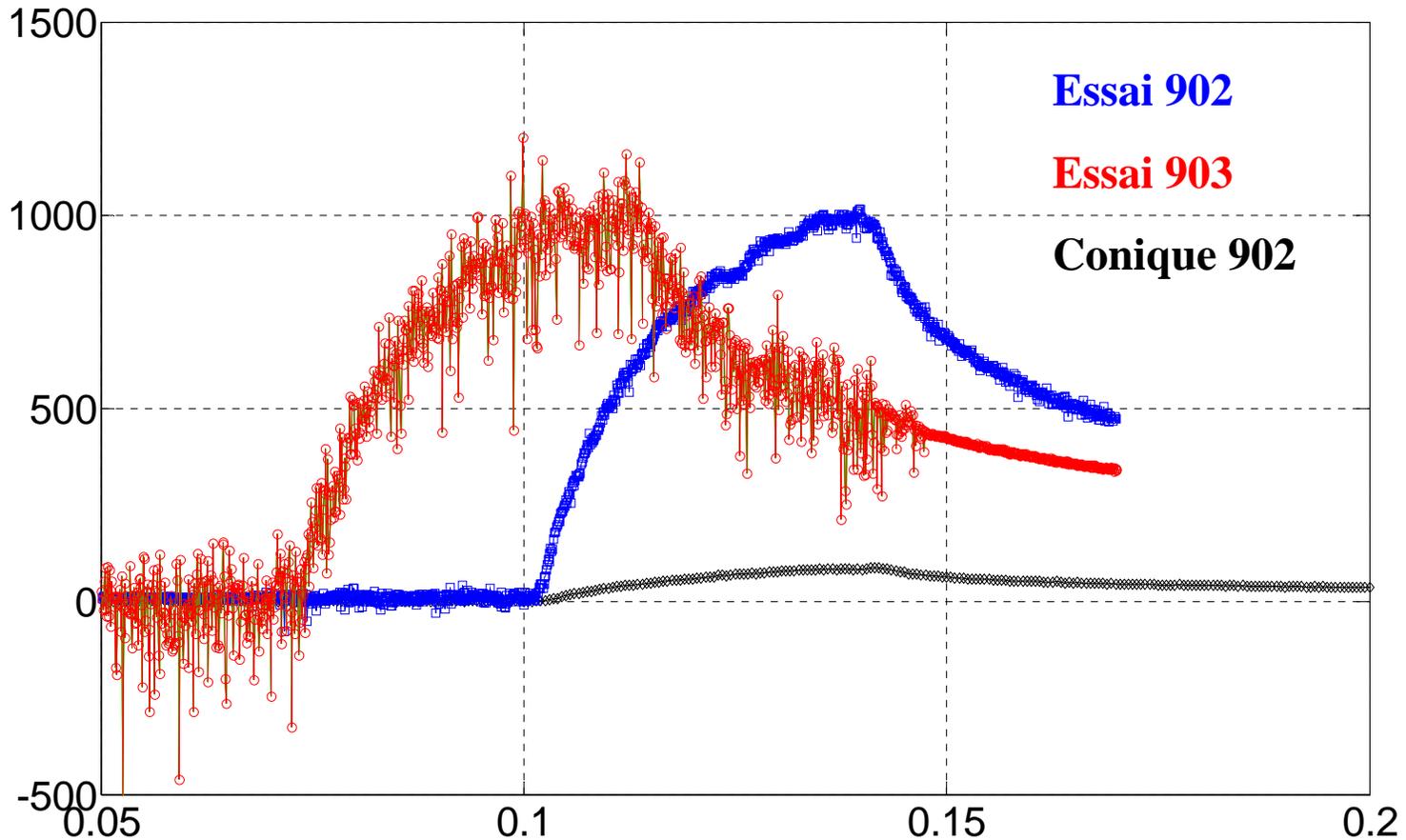


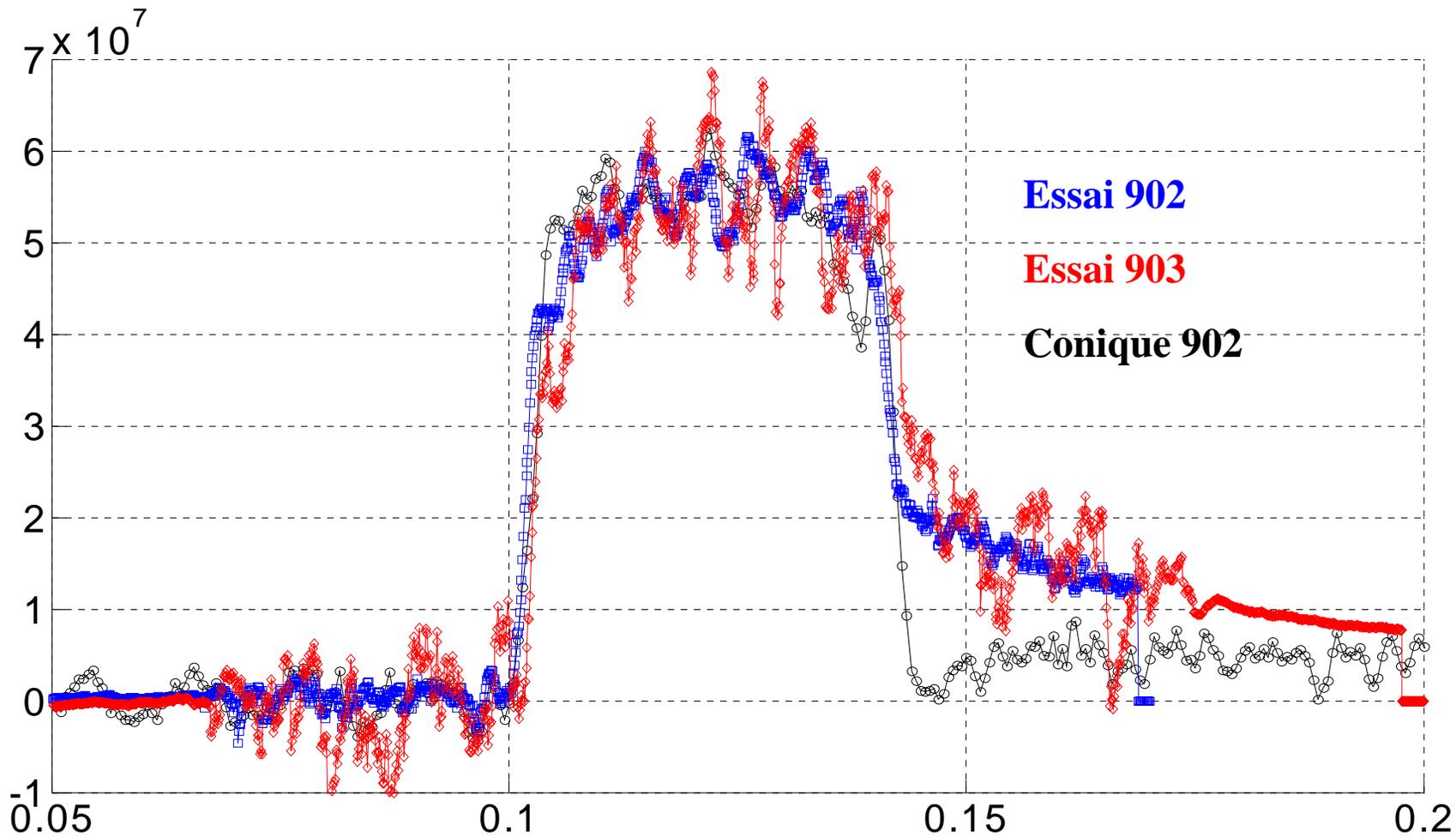
- Faible temps de réponse (pouvant atteindre la dizaine de  $\mu\text{s}$ )
- Mesure dans le jet plasma moins intrusive
- Capteur beaucoup plus sensible
- Capteur moins sensible aux perturbations électromag.
- Coût de la réalisation très faible



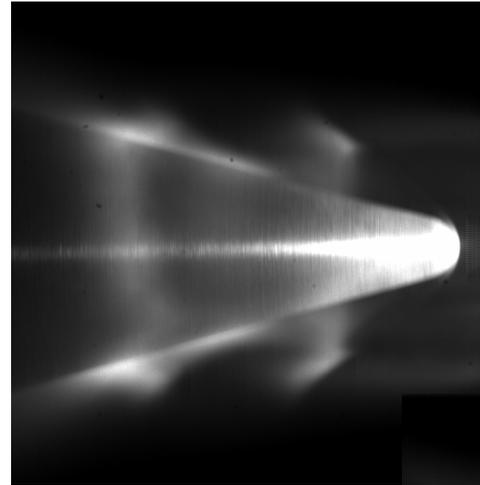
## Résultats de la campagne HP

- 3 types exploitables réalisés avec une puissance de près de  $60\text{MW/m}^2$
- 2 essais ont donné des résultats satisfaisants (le HP902 et le HP903)

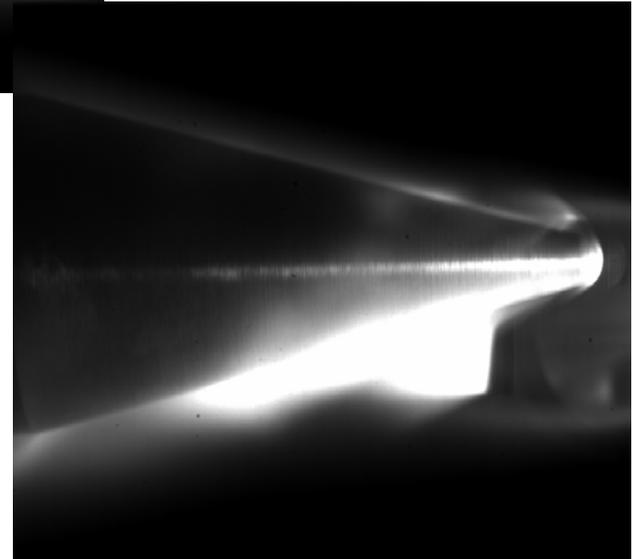
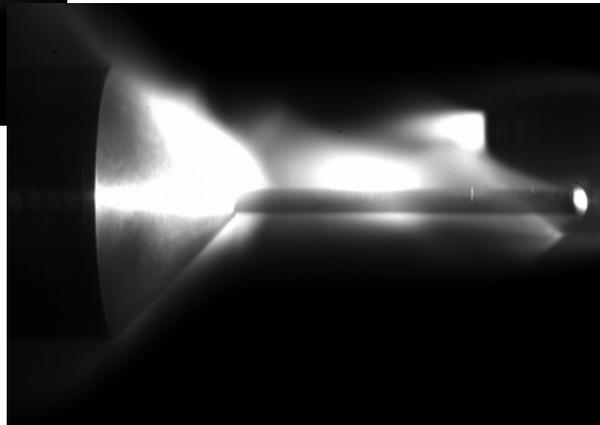
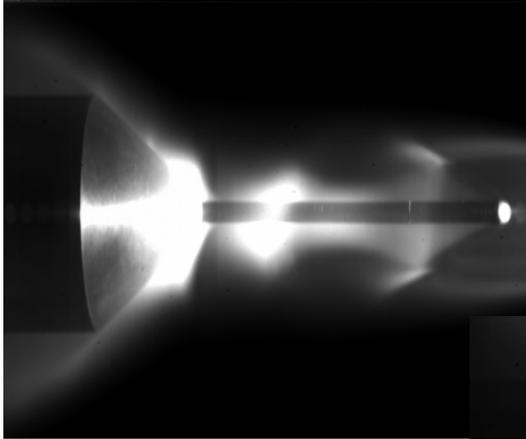




Design conique

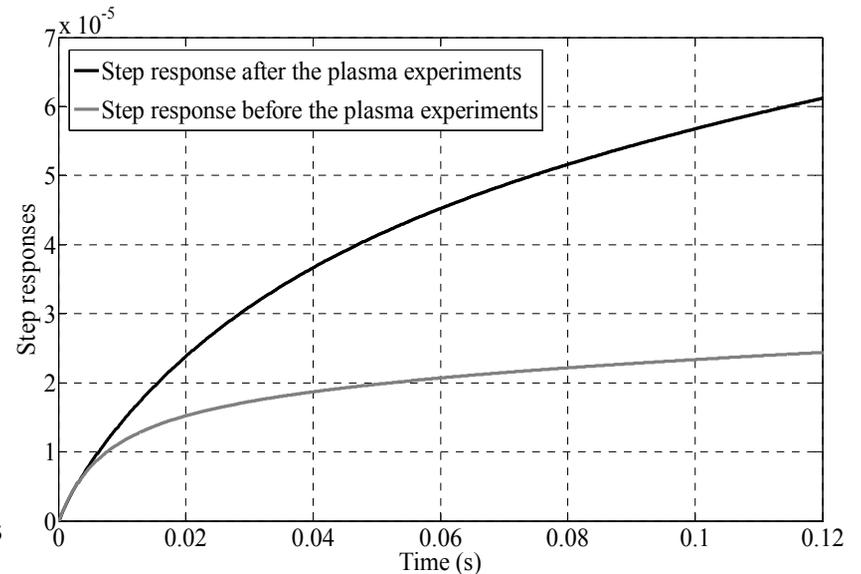
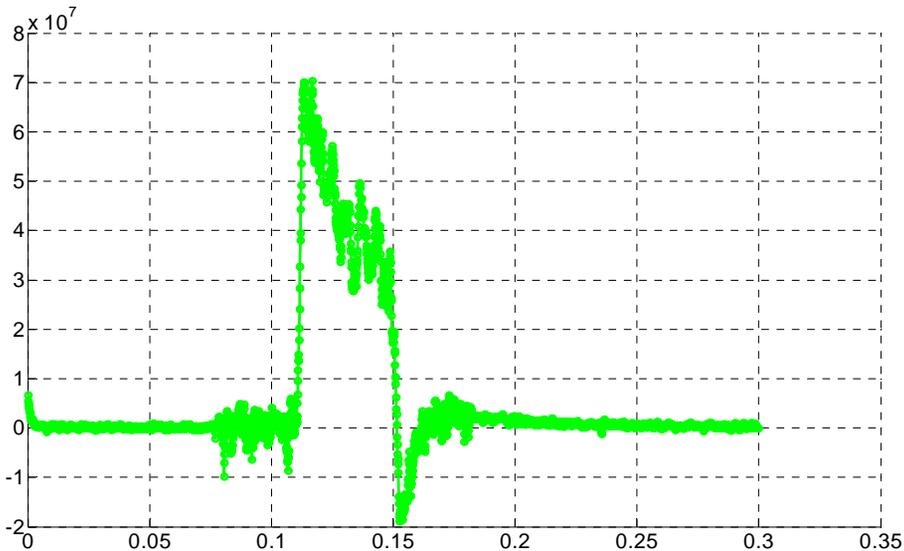


Design Stylo



## Gros bémol...

- Le fluxmètre semble avoir été endommagé entre les essais 2 et 3
- Le résultat obtenu pour le dernier essai n'est pas du tout satisfaisant...
- L'étude en laboratoire du fluxmètre après les essais confirme l'endommagement



- Perspectives :**
- Confrontation des résultats avec les calculs d'aérodynamique
  - Améliorer la réalisation du fluxmètre (dépôt d'un film céramique ?)
  - Laisser plus de gaine devant la soudure du TC (même si on augmente le temps de réponse du capteur)
  - Envisager un capteur avec plus de matière de manière à moins le chauffer

# **Conclusions et perspectives**

# **Conclusions**

**Méthode NISI fiable pour la caractérisation des fluxmètres**

**Amélioration de la méthode a permis d'estimer les paramètres à 1%**

**Conception et réalisation d'un nouveau fluxmètre**

**Fluxmètre plus rapide, moins intrusif, (moins cher)**

# **Perspectives**

**Amélioration de l'estimation du flux absorbé lors de l'estimation indispensable**

**Re-calibration des fluxmètres après chaque campagne**

**Amélioration du fluxmètre stylo indispensable pour empêcher sa dégradation**

# **Fluxmètres coniques**

# Etalonnages réalisés

**Objectif** : Faire le point sur le stock de fluxmètres coniques existants à EADS

- Contrôle qualitatif, 2 réponses indicielles (une de 50ms et une autre de 5ms)
- Estimation des paramètres du fluxmètre avec la procédure habituelle

