ASTELAB THERMIQUE 2016

Virtualisation de la conception et tests thermiques des systèmes

(22-23/09/2016- ICAM Toulouse)

Capteur de mesure du coefficient de transfert de chaleur entre l'action d'un fluide sur une paroi

Olivier Braillard (CEA Cadarache – DEN/DTN/STCP/LHC 13108 Saint-Paul-Lez-Durance - olivier.braillard@cea.fr)

Jean-marie Pinquier (société KAYME- 06, rue Georges GUYNEMER 78280 GUYANCOURT- jean-marie.pinquier@kayme.eu)

Les caractéristiques des transferts thermiques entre un fluide et une paroi ne peuvent pas toujours être estimées par calcul avec l'emploi de corrélations d'échange, qui sont en général limitées à des applications simples, en régime permanent non fluctuant, avec des fluides homogènes, assez loin des réelles applications de l'industrie.

C'est précisément pour répondre à un cas particulier que le CEA a conçu un capteur appelé « coef h » pour étudier les chargements thermiques en paroi dans les structures où siègent des zones de mélanges en régime turbulents à grand écart de température. L'objectif a été de développer un outil capable de mesurer expérimentalement les flux thermiques, les fluctuations de température, et le coefficient d'échange dans un composant de type té de mélange avec une grande dynamique. L'acquisition de ces paramètres constitue la source d'entrée pour effectuer les calculs mécaniques avec des données thermiques précises et évaluer la tenue à la fatigue des composants.

La connaissance du coefficient d'échange est essentielle dans l'amélioration des systèmes existants, pour l'aide à la conception, pour la qualification et la mesure de performance post-conception.

Dans une démarche de valorisation, ce capteur breveté par le CEA avec son algorithme de résolution peut également s'appliquer à d'autres applications thermiques, sa forme et son gabarit peut être adaptatif.

La société Kayme assure la conception en fonction d'un cahier des charges du client, l'adaptation à l'application, la fabrication et la distribution commerciale.

Présentation du capteur coef h

De très petite taille (∅ 6 mm et 8 mm de hauteur) (Figure 1), il est équipé de 3 micro-thermocouples (∅ 25 µm) soudés à l'intérieur du corps de mesure (cellule de flux) pour acquérir la température dans ce puits thermique à différentes distances de la paroi et d'un thermocouple externe (∅ 0,3 mm) qui mesure la température du fluide en écoulement. Le matériau constitutif des éléments du capteur est identique à la paroi réceptrice support, limitant ainsi les flux parasites transverses. Un algorithme de traitement des acquisitions permet de déduire le flux thermique q(t) et de remonter à la température pariétale Tp(t). Le temps de réponse des micro-thermocouples de 30 µs offre une dynamique très élevée. En fréquence d'acquisition, les caractéristiques thermiques sont plutôt limitées par la diffusivité du matériau support et par le thermocouple fluide (temps de réponse de 10 ms). La mesure thermique intrusive dans la paroi est quasi absente avec les micro-thermocouples.

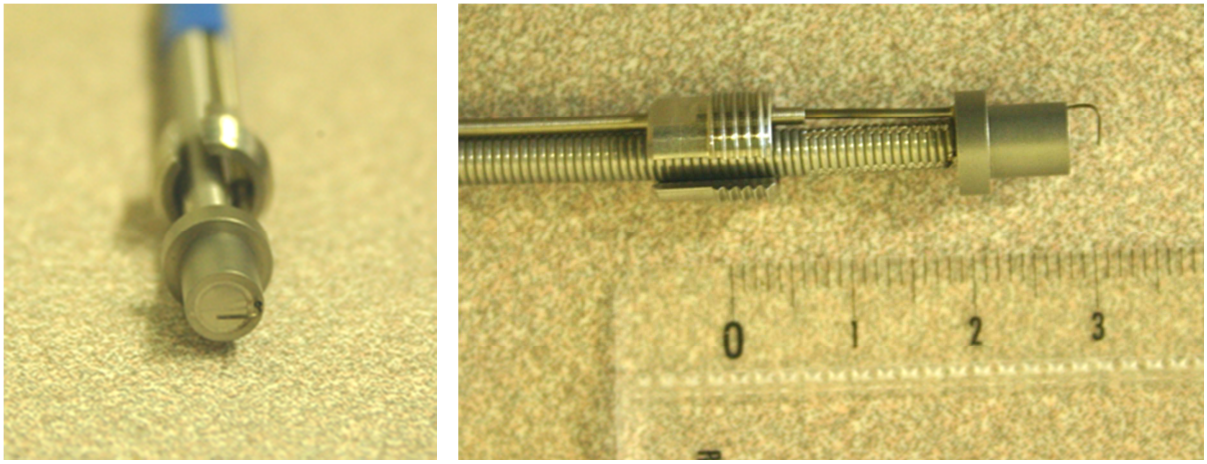


Figure 1 : le capteur « coefh » avec son système de fixation

Les distances des micro-thermocouples sont mesurées avec précision (vernier et mesure sous binoculaire : Tolérance 5 µm) à respectivement 300 µm, 1400 µm et 2500 µm pour le troisième. L'incertitude de la mesure est directement liée à la connaissance précise des distances à la paroi.

Applications

Le coefficient d'échange est le paramètre dimensionnant pour les transferts de chaleur fluide vers une paroi.

En conception sa connaissance est déterminante pour le dimensionnement des échangeurs. Sur un appareil existant, il permet de caractériser les performances du transfert thermique. Le capteur coef h peut précisément mesurer ce paramètre et apporter son concours dans de nombreuses activités de l'industrie :

- Aide à la conception et au dimensionnement,

- Caractérisation d'un échange
- Qualification sur matériel existant et amélioration
- Suivi et proccess de fonctionnement (exemple : mesure et suivi de l'encrassement)

Dans les problèmes usuels rencontrés par l'ingénieur, le coefficient d'échange peut être déterminé avec des corrélations basées sur le calcul du nombre de Nusselt, du Prandtl et du Reynolds. Ces corrélations sont calculées avec des paramètres (vitesse du fluide, viscosité) qui sont souvent inconnus localement dans les applications industrielles.

Dans de nombreux cas, il est impossible d'estimer correctement le coefficient d'échange, les corrélations étant inadaptées. Le recours à l'expérience est indispensable.

Les corrélations sont inopérantes dans les cas :

- de mélange de fluides de nature différente,
- de fluides de même nature mais à température différentes,
- de fluides en diphasiques
- de fluides chargés de particules,
- de singularités géométriques générant des grosses structures turbulentes dans le fluide.

En revanche, tous ces domaines représentent les cas d'application du capteur « coef h » où il apporte expérimentalement localement une réponse précise.

Gamme de mesure - dynamique

La dynamique du coefh est très élevée, les thermocouples en paroi de 25 µm de diamètre autorisent un temps de réponse de 30 µs. La rapidité du thermocouple est bien supérieure à la plupart des parois métalliques. Par conséquent, la mesure des températures et le calcul du flux ne sont pas impactés par la présence des thermocouples même à fréquence élevée.

Le thermocouple dans le fluide, dimensionné à 0,3 mm pour un compromis robustesse mécanique/performance thermique permet un temps de réponse sans atténuation jusqu'à 20 Hz.

Cette dynamique permet de mesurer le coefficient d'échange en fonction de la fréquence des fluctuations thermiques. Les flux mesurés ne sont pas limités en amplitude.

Principe physique

L'évolution temporelle de la température T(t) dans le capteur est régie par la loi de Fourier.

$$\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \qquad \alpha = \frac{\lambda}{\rho Cp}$$

Avec x : profondeur normale à la paroi tel que x=0 en paroi interne x=l en paroi externe

α : la diffusivité thermique (m²/s) - ρ : masse volumique (kg/m³)
λ : conductibilité thermique (W/m.°C) - Cp = chaleur massique (kJ/kg.°C)

Les caractéristiques sont celles du matériau constitutif du capteur. A l'aide de trois mesures de température placées dans la paroi du capteur situées à trois distances de la paroi, le flux thermique en conduction q(t) est déterminé dans la paroi du capteur (Figure 2).

$$q(t) = -\lambda \frac{\partial T(x,t)}{\partial x}$$

Le flux conduit à l'intérieur du capteur est égal au flux convecté par le fluide. Cette hypothèse est valable pour autant que le flux de chaleur provienne exclusivement du fluide. Par construction, le capteur est peu sensible aux flux environnant venant de l'arrière (isolé thermiquement) et de la paroi latérale cylindrique où un jeu de quelques dixièmes de millimètre entre le capteur et son logement l'isole thermiquement.

$$q_{Cond}(t) = -\lambda \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} = q_{Convec}(t)$$

Ce flux permet de remonter à la température paroi Tp(t) à l'aide d'un algorithme adapté de conduction inverse pour un modèle de mur semi-infini.

L'algorithme utilise des variables fonction du nombre de Biot et de Fourier. La résolution thermique est appliquée à un maillage du capteur respectant le critère de Fourier. Le flux q(t) et la température pariétale Tp(t) sont déduits.

Enfin, en utilisant la mesure de température dans le fluide placé à 2 mm (cote c) de la paroi (en local) on en déduit le coefficient d'échange local instationnaire.

$$q(t) = -\lambda \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} = h(t)\left(T_F(c,t) - T_P(0,t)\right)$$

Le coefficient d'échange h(t) peut être constant ou variable en fréquence.

Algorithme de traitement : calcul du flux et de la température pariétale

Le matériau est considéré comme isotrope et homogène, les caractéristiques thermiques sont constantes (conductibilité thermique, diffusivité, chaleur massique) et le flux thermique est supposé 1D, normal à la paroi. Cette hypothèse pourra être vérifiée. Les données thermiques (chaleur massique, conductibilité thermique, et masse volumique) sont choisies en fonction de la température moyenne d'utilisation du capteur. Elles peuvent être variables ou constantes.

La paroi du capteur est modélisée selon des éléments de type segment. Selon les caractéristiques thermiques de la paroi, de la bande passante des fluctuations que l'on souhaite observer et de la marge d'erreur spécifiée, le maillage sera plus ou moins raffiné (en augmentant le nombre de mailles).

Le traitement est basé sur le principe de la méthode de J.V Beck qui travaille selon une approximation aux différences finies de l'équation de conduction s'appuyant sur un concept de spécification de fonction et de pas de temps futur. L'algorithme fonctionne avec au moins 2 mesures de température dans la paroi avec des coefficients de sensibilité liés à la position des thermocouples.

$$q(t_{k+1}) = q(t_k) + \sum_{k=1}^{r} \sum_{i=1}^{2} \left[Y_i(t_k) - \hat{T}_i(t_k) \right] / K_i^k$$

$q(t_k)$ *: flux à l'instant k*

$Y_i(t_k)$ *: température mesurée des thermocouples paroi (i = 1,2,3 indice de thermocouple)*

$\hat{T}_i(t_k)$ *: température calculée selon l'équation de conduction en 1D à la position respective des thermocouples en paroi*

K_i^k *: coefficient de sensibilité*

r : nombre de pas de temps futur (r = 1,2,3,4,5)

La température est calculée $\hat{T}_i(t_k)$ *en spécifiant que le flux reste constant dans l'intervalle* $[t_k, t_{k+r}]$.

La température mesurée par le troisième thermocouple $Y_3(t_k)$ est utilisée comme condition limite à chaque pas de temps.

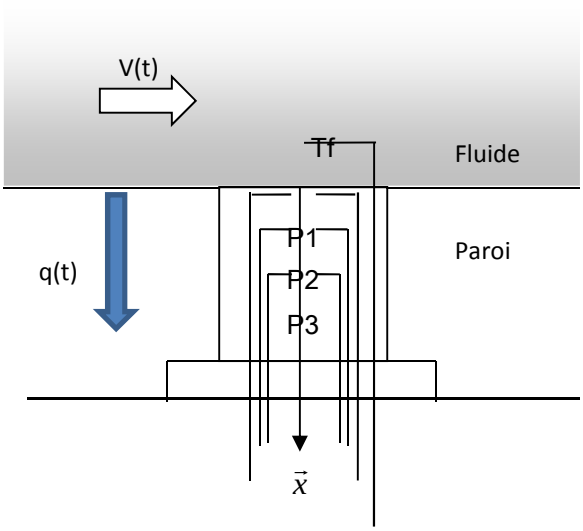


Figure 2 : capteur coef h dans une paroi

La précision de la détermination du flux et de la température pariétale dépend très sensiblement de la connaissance exacte de la position des thermocouples. Aussi, celle-ci, mesurée à l'aide d'une binoculaire après l'opération de soudure des fils des micro-thermocouples (∅ 25 µm) sont répertoriés. Chaque capteur « coefh » a donc une réponse qui lui est propre, fonction des 3 distances réelles (x_1, x_2, x_3) mesurées pour P1, P2, P3.

Caractéristiques thermiques mesurées

Les températures mesurées (Tf, P1, P2, P3) et les données déduites (le flux q, la température pariétale Tp, et le coefficient d'échange h) peuvent être traitées en représentation temporelle ou en représentation spectrale suivant le type de signal de température.

Par exemple, un signal de température de type échelon fournira à chaque pas de temps les paramètres thermiques suivants :

- q(t), Tp(t), et le coefficient d'échange h(t).

Dans le cas des fluctuations de température autour d'une température moyenne constante la représentation spectrale sera préférée.

Le coefficient d'échange est calculé selon 3 méthodes utilisant les DSP (densité spectrale de puissance) :

- la méthode directe avec les signaux Tf et Tp réels : méthode qui prend en compte le déphasage qui existe entre Tf et Tp,

- la méthode synchrone avec des signaux Tf et Tp synchrones : cette méthode est plus conservative, elle s'intéresse qu'au transfert de puissance sans tenir compte du déphasage, elle traite les modules des grandeurs Tf et Tp

- La méthode de la fonction de transfert : Le coefficient d'échange est modélisé. Le signal du thermocouple fluide est utilisé pour calculer la température du premier thermocouple. Par identification, à chaque pas de fréquence, on ajuste le coefficient d'échange pour obtenir la température mesurée au premier thermocouple P1

Méthode temporelle : signaux réels

La méthode temporelle trace directement le coefficient d'échange en fonction du temps. Cette méthode peut être utilisée pour des échelons de température. Il faut veiller cependant à ce que les signaux de température soient assez différents en amplitude, cela conditionne la précision de cette méthode qui est généralement moins adaptée que les méthodes spectrales pour les régimes permanents qui présentent de faibles différences de température entre les mesures.

Avec le flux q(t) et la température paroi déduits Tp(t), et la mesure Tf(t) on détermine h(t) comme suit :

$$h(t)=\frac{q(t)}{Tf\,(t)-Tp(t)}$$

Méthode spectrale 1 : signaux réels

Avec le flux q(t), on calcule la densité spectrale de puissance DSP [q(t)]

$$DSP[q(t)] = \Phi.\Phi^{*} \text{ avec } \quad \Phi(\nu) = \int_{0}^{\infty} q(t)\, e^{-2\pi\nu} dt \quad \text{avec } \Phi^{*}(t) \text{ : conjugué de } \Phi(t)$$

$$q(t) \xrightarrow{T.F} DSP[q(t)]$$

Avec les températures Tf et Tp, on calcule (Tf – Tp)(t) puis on détermine la DSP de l'écart de température.

$$(T_F - T_P)(t) \xrightarrow{T.F} DSP[(T_F - T_P)(t)]$$

On déduit h comme suit :

$$h_{réel}(\nu) = \sqrt{\frac{DSP[q(t)]}{DSP[(T_F - T_P)(t)]}}$$

Pour $h_{réel}$, il s'agit du module de l'écart de température Tf -Tp

Méthode spectrale 2: signaux synchrones

Avec les températures temporelles Tf(t) mesurée et Tp(t) déduite, on détermine la $DSP[T_F(t)]$ et la $DSP[T_P(t)]$

$$T_F(t) \xrightarrow{T.F} DSP[T_F(t)]$$
$$T_P(t) \xrightarrow{T.F} DSP[T_P(t)]$$

On reprend le flux q(t) calculé précédemment :

$$q(t) \xrightarrow{T.F} DSP[q(t)]$$

On déduit h comme suit :

$$h_{synchrone}(\nu) = \frac{\sqrt{DSP[q(t)]}}{\sqrt{DSP[T_F(t)]} - \sqrt{DSP[T_P(t)]}}$$

Pour $h_{synchrone}$, il s'agit de l'écart du module des températures Tf et Tp

Une étude de sensibilité sur l'action du déphasage montre que $h_{synchrone}$ correspond à la valeur maximale de h obtenue. Cela correspond également à $h_{réel}$ si l'on rephase les signaux Tf et Tp déphasés.

$h_{synchrone}(\nu) = h_{réel}(\nu)$ si φ (Tf,Tp) = 0

La fonction obtenue $h_{synchrone}$ est un extremum de la fonction $h_{réel}$.

Méthode spectrale 3 : identification par une fonction de transfert

On applique à la température Tf un coefficient d'échange fictif déterminé avec les caractéristiques thermiques de la paroi. Par identification on ajuste la valeur du h fictif pour calculer la température en P1 qui convient pour retrouver la température paroi expérimentale en P1, sur la DSP et à chaque pas de fréquence.

$$DSP[T_F(t)] = [H(\upsilon)]^2 . DSP[P1(t)]$$

La fonction de transfert H(υ) dépend des paramètres thermiques en paroi, où la conductivité, la pulsation, la diffusivité, et la distance à la paroi de P1 sont connues où h(υ) peut être isolé.

$$H(\upsilon) = f(h, \lambda, \omega, \alpha, x)$$

On en déduit h(υ) en représentation fréquentielle.

$h_{synchrone}$ donne les valeurs de coefficient d'échange les plus élevées, puis

la méthode « fonction de transfert » donne des valeurs intermédiaires située au-dessus de la méthode signaux réels qui présente les plus faibles valeurs (Figure 3). L'écart entre les trois méthodes n'excède pas 10 %.

La Figure 3 présente l'organigramme de l'algorithme

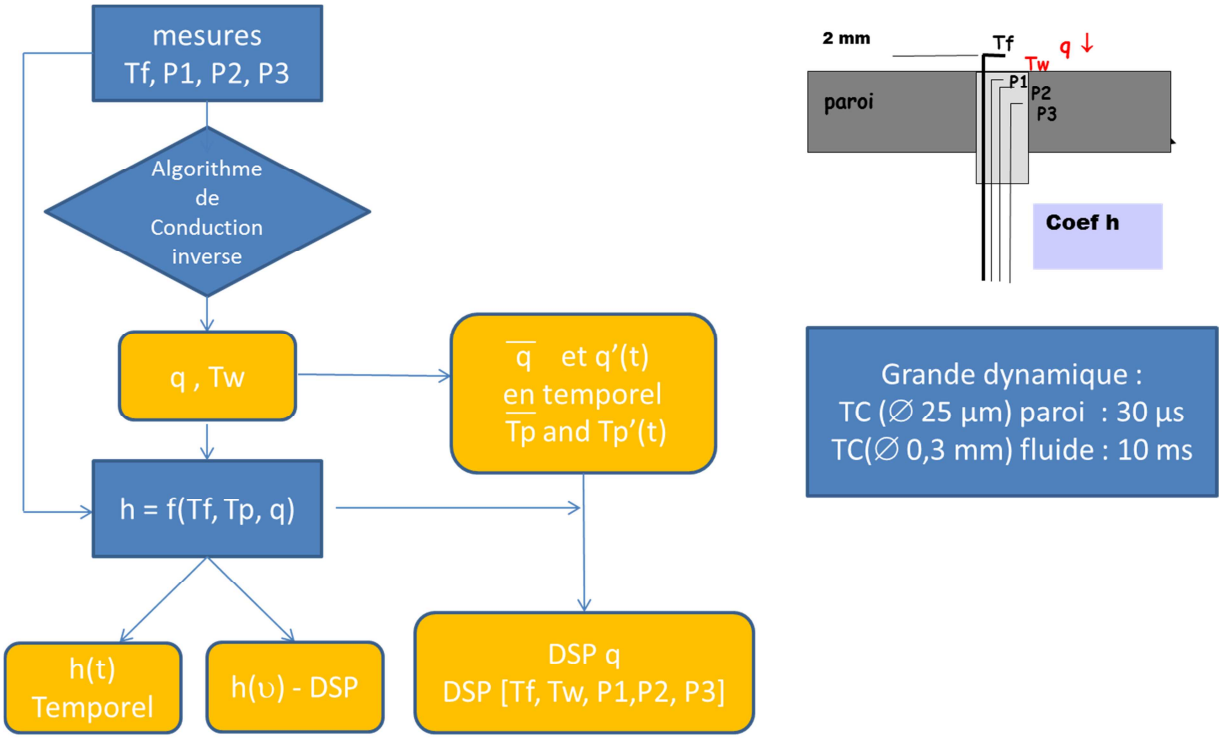


Figure 3 : architecture de l'algorithme

Montage

Le montage et le câblage sont directement liés à l'application.

Dans le cas d'une tuyauterie avec un fluide en pression et en température le capteur est installé dans un bossage. La partie cylindrique est terminée à l'arrière par un lamage qui positionné dans un bossage permet d'assurer les fonctions de fixation avec un écrou, et d'étanchéité avec un joint torique. Sous le lamage, de petites cales prennent place pour assurer la continuité de la surface active du capteur et de la paroi (capteur affleurant à la paroi).

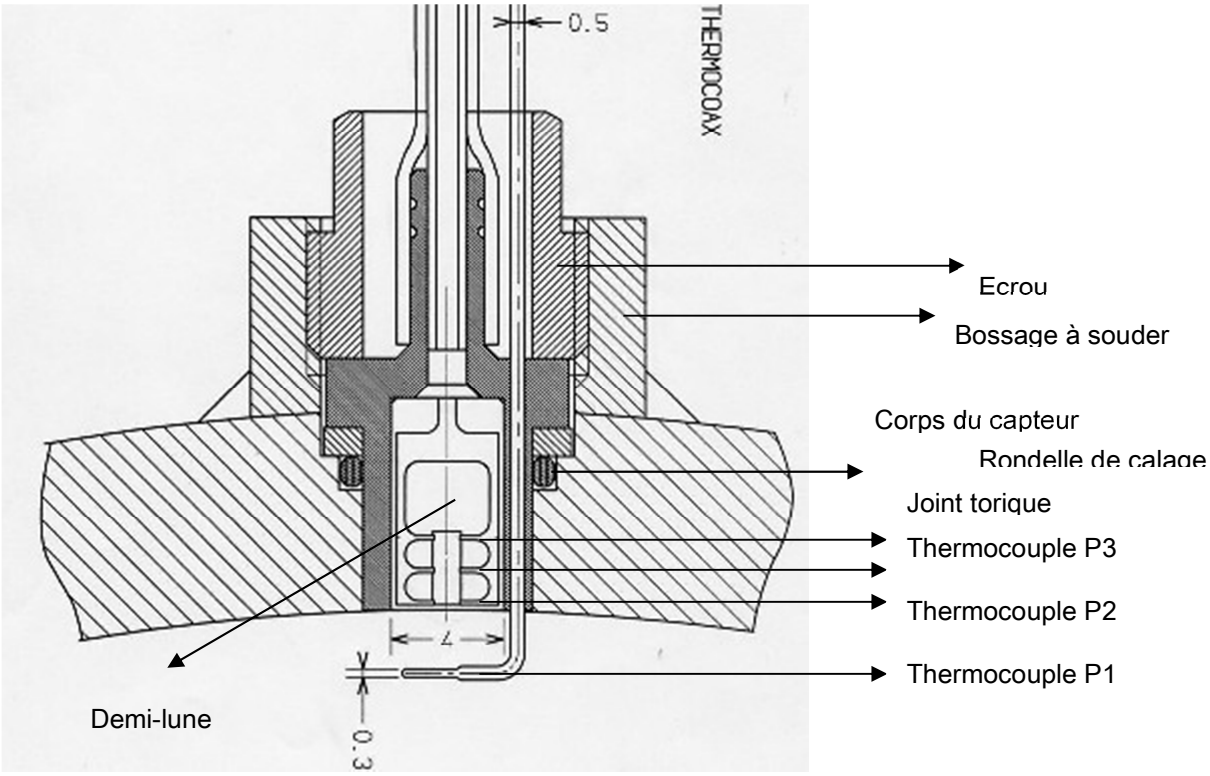


Figure 4 : capteur coef h dans son bossage (paroi cylindrique tuyauterie)

Le capteur coef h est constitué de 3 pièces (Figure 4, Figure 5), 2 demi-lunes et une frette cylindrique. Une des demi-lunes est ablatée pour tracer le cheminement des thermocouples. Les 2 demi-lunes sont réunies et insérées dans le cylindre percé qui constitue le corps externe du capteur.

La Figure 5 montre le capteur en coupe, on note le cheminement réalisé par ablation laser pour le passage des 6 fils des thermocouples soudés dans la demi-lune.

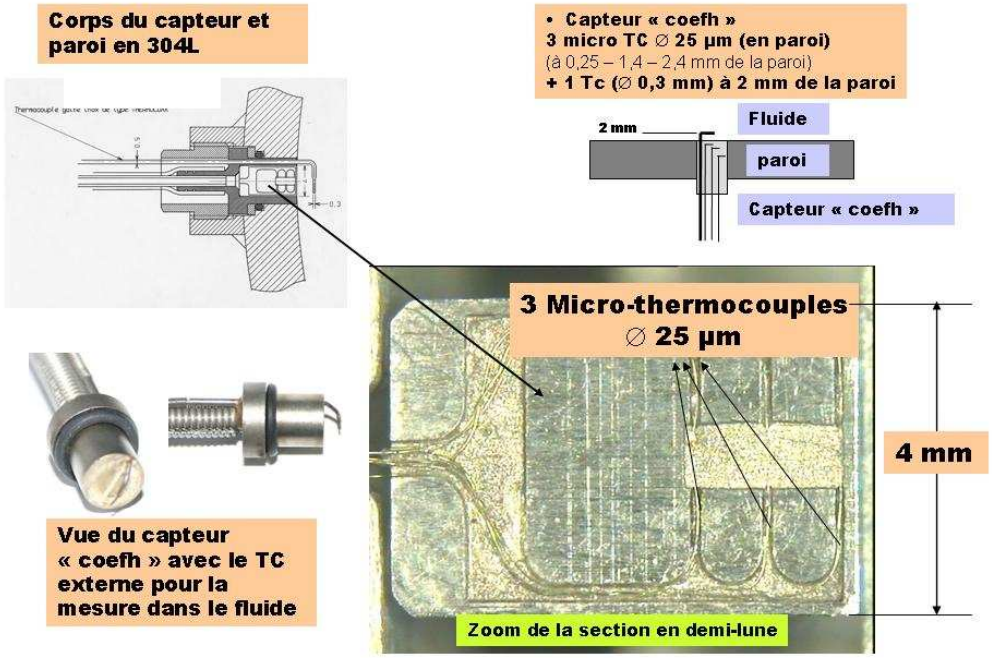


Figure 5 : coupe du capteur avec les micro-thermocouples soudés dans la demi-lune

Conditions d'utilisation

Initialement le capteur a été conçu pour l'expérience Father dans des maquettes de té de mélange avec les conditions de calcul suivantes :

- Pression 60 bars et température 250°C

Pour une application particulière, la soudure d'étanchéité des demi-lunes a été testée sur une cellule. Les conditions atteintes en pression et température ont été de 250 bars (pointe à 400 bars et 400°C)

NB : Une famille de capteurs a été mise sur le marché en regard des applications en température et en dimension.

La température de changement des câbles est de 400°C (passage de câbles isolés en standard à ceux en câbles chemisés isolant minéral). Nous n'avons pas encore expérimenté cette solution au-delà de 700°C.

Un mini coef h a été réalisé en Ø 2,5 mm (Figure 6).

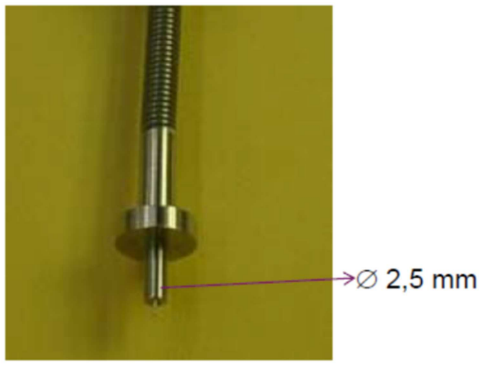


Figure 6 : vue du mini-coef h

Logiciel de traitement Coef h

L'algorithme permettant d'atteindre les caractéristiques thermiques est traduit dans une version industrielle exploitable sous windows.

L'interface est interactive et permet à l'utilisateur d'introduire et de visualiser les données sans difficulté.

L'algorithme est également protégé. Le capteur peut être approvisionné seul ou avec l'algorithme.La Figure 7 présente un exemple des fenêtres d'introduction de données de la version exécutable de l'algorithme.

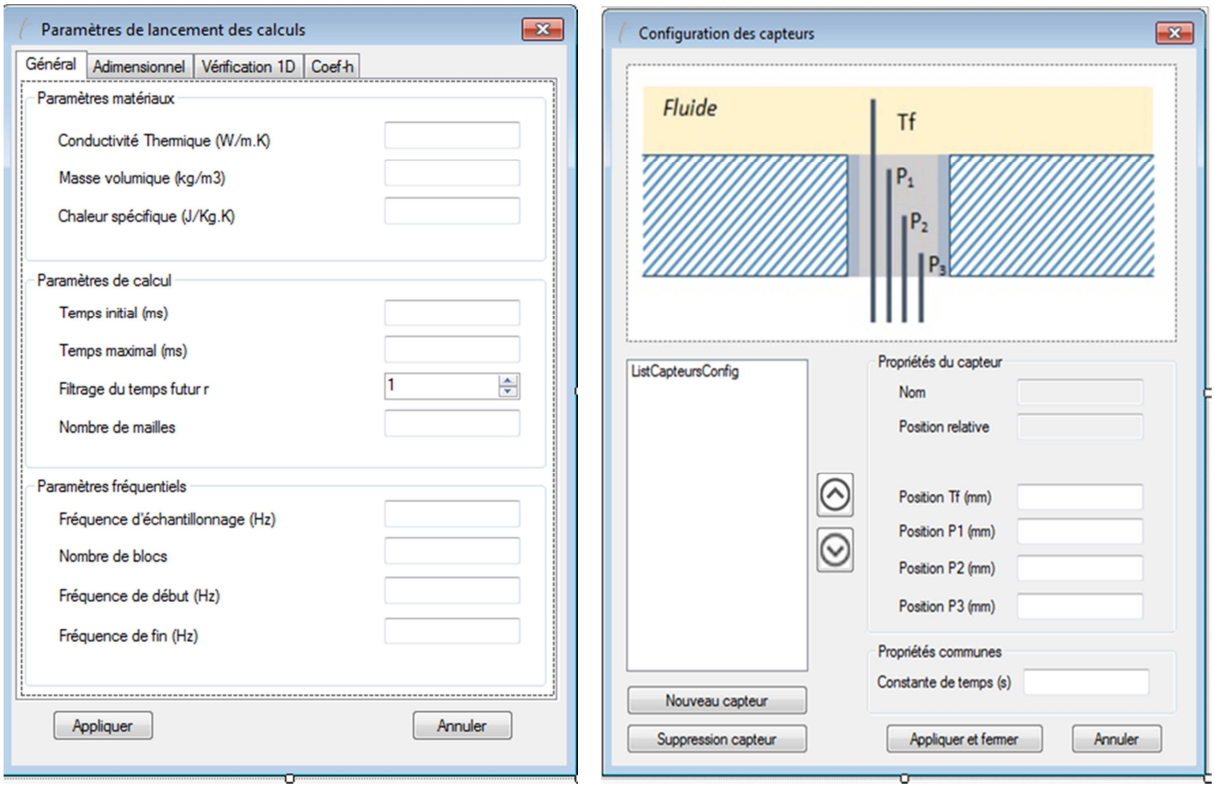


Figure 7 : exemple de présentation de l'interface IHC de l'algorithme

Exemples de résultat

Dans les cas de régime transitoire, comme les échelons de température, la représentation temporelle est en général sélectionnée. La Figure 8 montre le résultat d'un échelon négatif (chocs froid) à grand débit dans une conduite. En local, à chaque pas de temps, on peut mesurer le flux thermique instantané, la température de paroi déduite (Figure 8), et le coefficient d'échange (Figure 9).

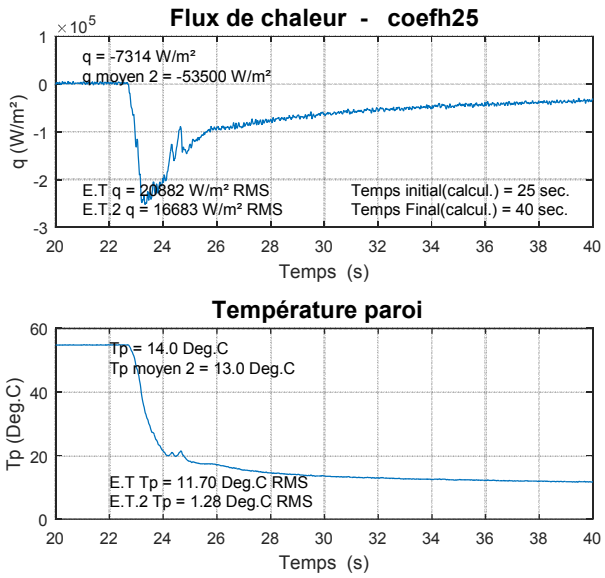


Figure 8 : exemple de flux de chaleur et de la température paroi d'un choc froid (échelon négatif) à grand débit dans une conduite

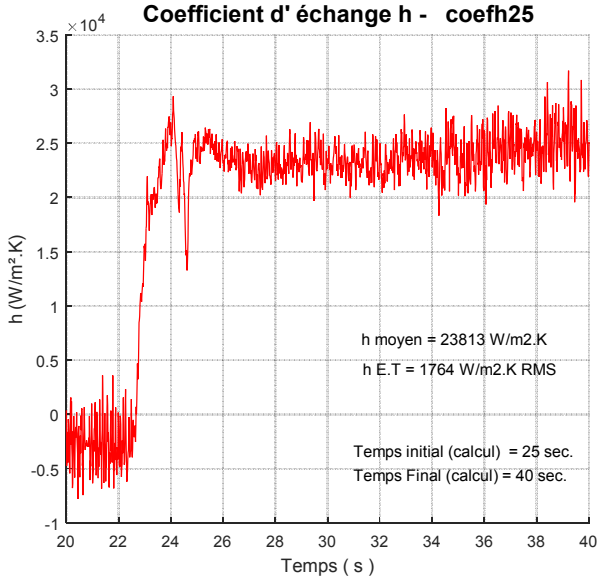


Figure 9 : exemple du coefficient d'échange obtenu pour le même choc froid à grand débit en représentation temporelle

En régime permanent, (fluctuation de température autour d'une moyenne constante), la représentation spectrale est préférée, l'estimation statistique est améliorée avec la durée de l'acquisition.

La

Figure 10 montre le coefficient d'échange dans une conduite en fonction de la fréquence pour 2 valeurs de Reynolds en écoulement turbulent. Dans cet exemple, en local, on peut observer un pic à environ 1 Hz qui pourrait être l'effet d'un tourbillon à proximité de la paroi.

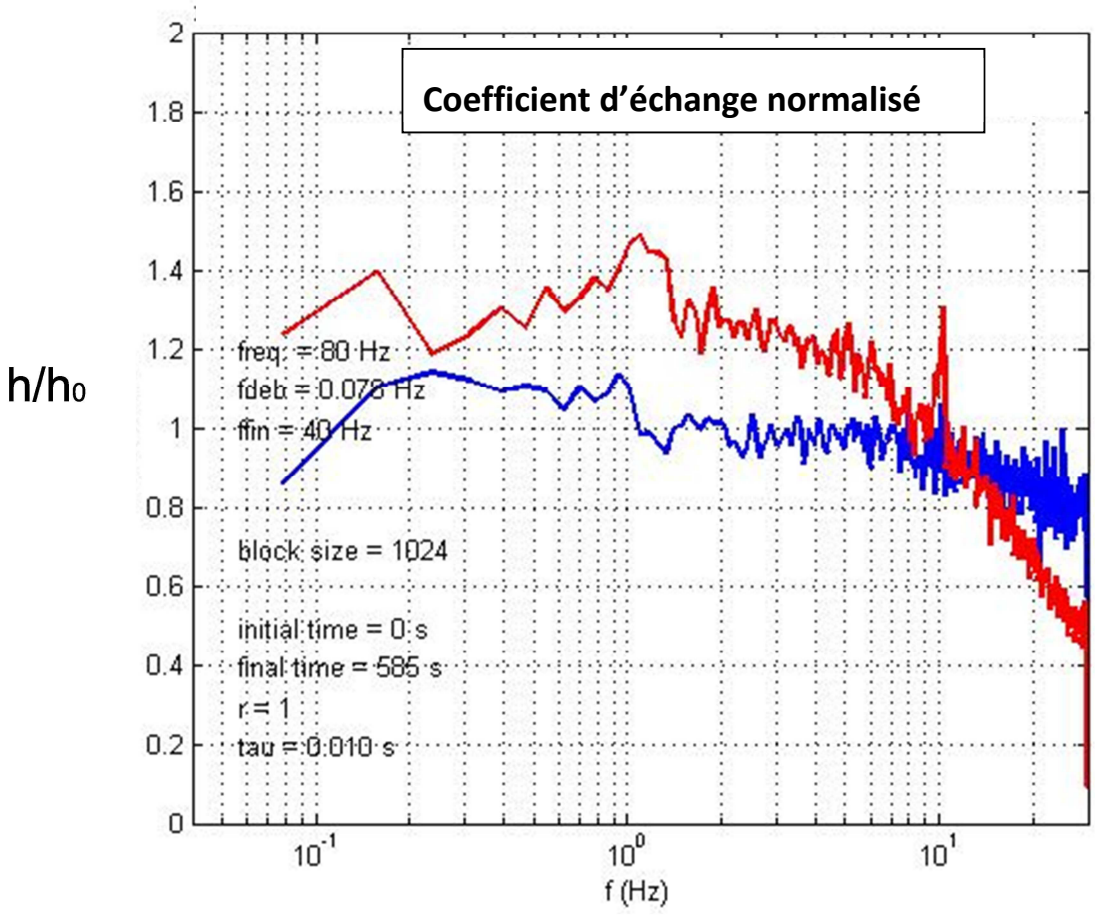


Figure 10 : exemple de coefficient d'échange (normalisé) dans un mélange pour 2 valeurs de Reynolds en représentation spectrale

La Figure 11 présente les densités spectrale de puissance (DSP) des températures en fonction de la fréquence. Les courbes Tf(f) et Tw(f) (Tp(f)) sont utilisées pour la détermination du coefficient d'échange h (W/m².K) en fonction de la fréquence.

Les mesures P1(f), P2(f), et P3(t) sont les DSP des mesures de température dans la paroi.

La mesure Tf-no att. correspond au résultat du programme de désatténuation de la température Tf.

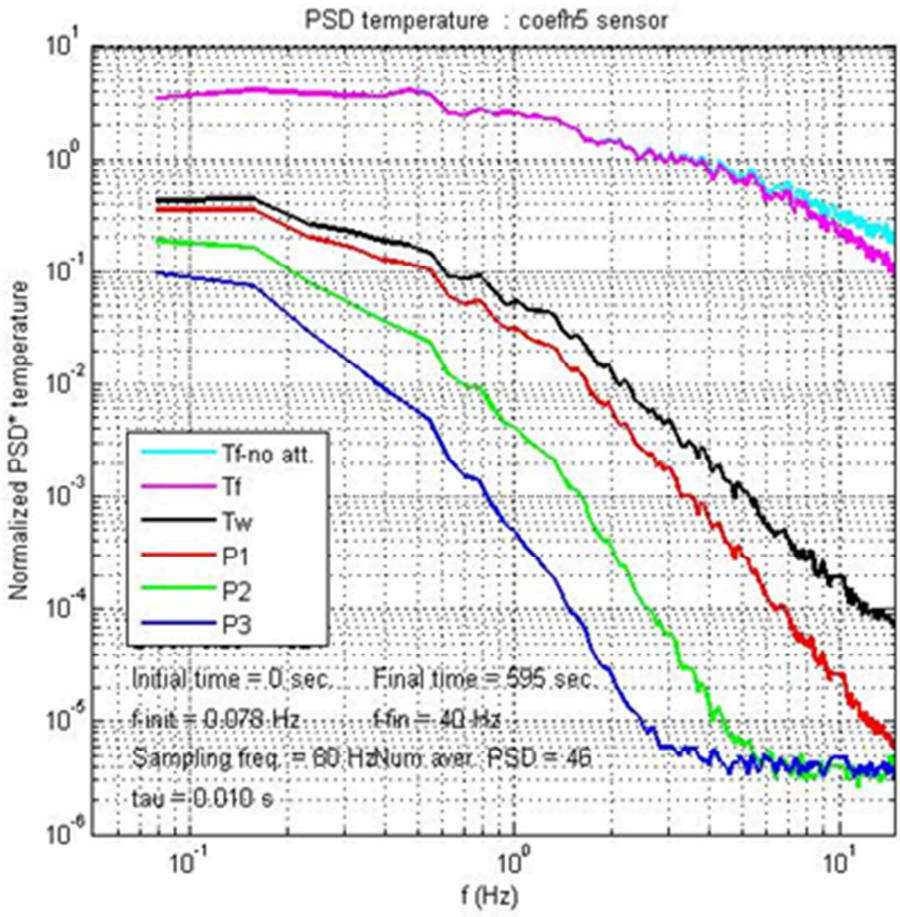


Figure 11 : Exemple de DSP des températures mesurées et déduite (Tf, Tf-no att, Tp, P1, P2, P3)

Tests de qualification – tests - Incertitudes

La Figure 12 montre une réponse suite à un échelon de température convectif de 60°C.

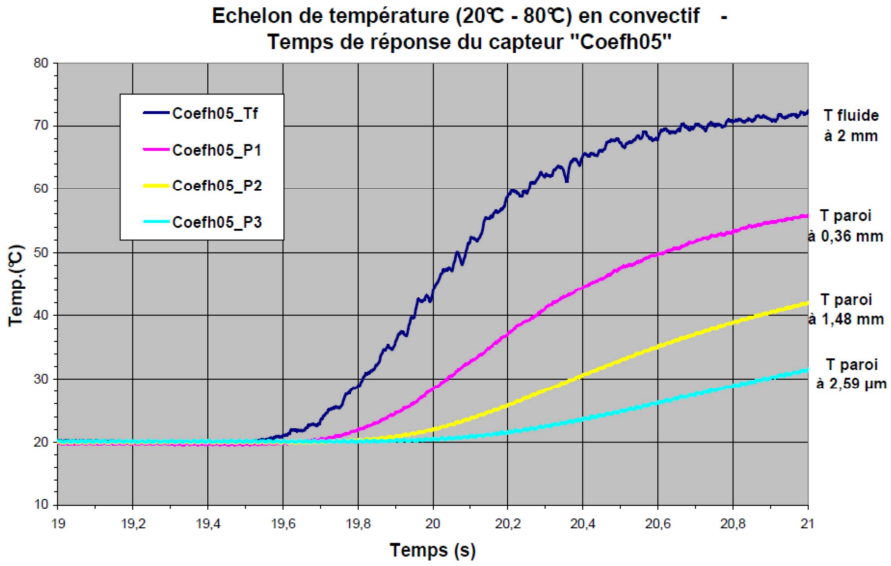


Figure 12 : Exemple de températures mesurées et déduite (Tf, P1, P2, P3) suite à un échelon de température

Vérification de la distance des Thermocouples

La Figure 13 compare la réponse du coef h à la réponse théorique suite à un échelon de flux radiatif. Cette vérification initiale permet de vérifier l'emplacement des thermocouples, donc la distance à la paroi qui est le paramètre le plus déterminant dans la précision.

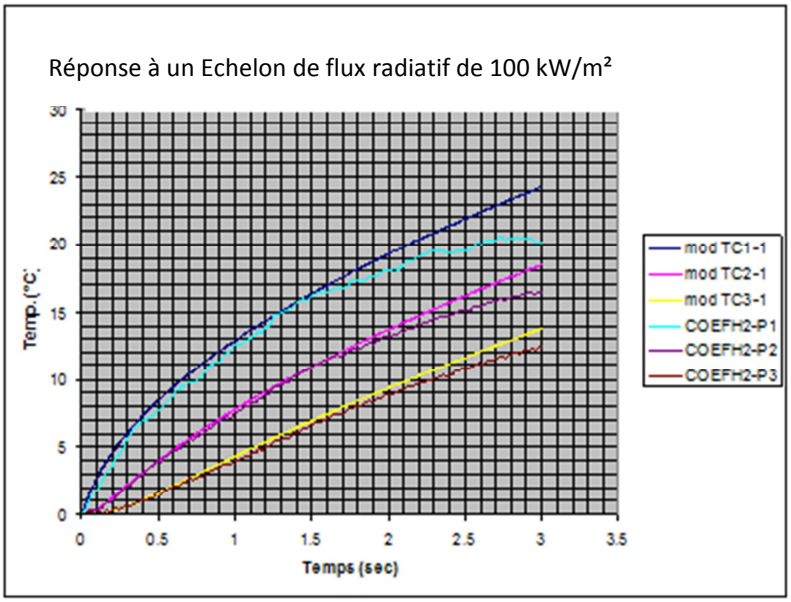


Figure 13 : réponse expérimentale et comparaison à la réponse théorique 1 D

Vérification de l'hypothèse 1D du flux de chaleur

La vérification de l'hypothèse 1D du flux de chaleur (⊥ à la paroi) est réalisé en calculant les réponses des thermocouples P2 et P3 en utilisant le signal de P1 et les distances à la paroi de P2 et P3 données par le constructeur. On note Figure 14 que l'hypothèse 1D est bien vérifiée sur le signal P2, le signal le P3 montre un léger écart à basse fréquence attribué à des effets latéraux de conduction à la distance P3.

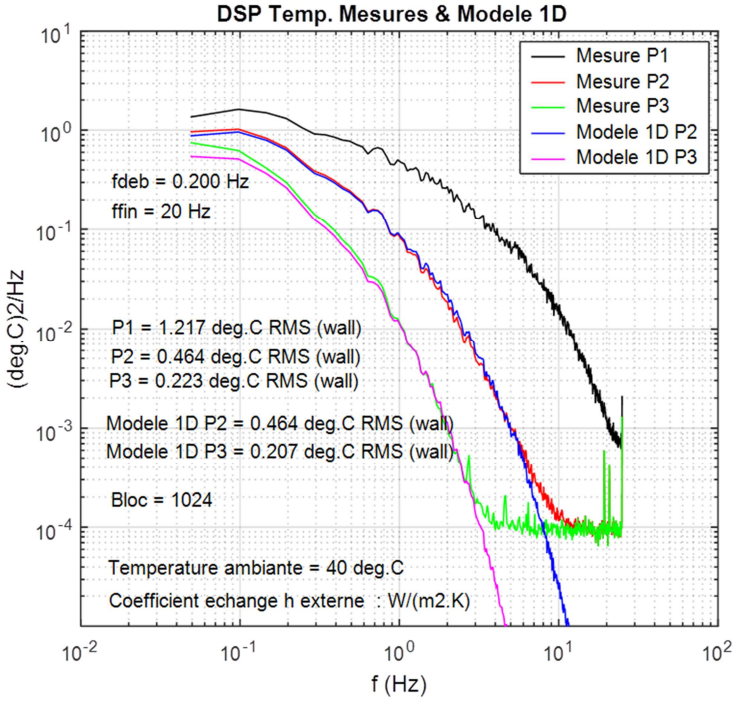


Figure 14 : vérification du flux de chaleur avec le modèle 1D

Option : Désatténuation de la température fluide

Le thermocouple de la température fluide avec son diamètre de 0,3 mm présente la dynamique la moins élevée et il joue le rôle d'un filtre passe bas sensiblement à partir de 20 Hz. Pour corriger le signal de température uniquement dans le domaine spectral, on utilise un programme de désatténuation qui trace la vraie température fluide sans l'effet filtre du thermocouple noté Tf-no att sur la Figure 11.

Incertitudes sur les résultats (flux et coefficient d'échange)

L'incertitude est liée à l'erreur commise sur la distance des thermocouples, en particulier pour P1 en très proche paroi et sur caractéristiques physiques de la diffusivité (masse volumique, chaleur massique et conductivité).

Le Tableau 1 montre la forte sensibilité de l'incertitude sur la distance à la paroi de P1 et explique la nécessité de mesurer à la binoculaire la distance réelle après les soudures des fils de thermocouple.

La tolérance de la position d'un fil thermocouple dans le corps du capteur est de 5 µm. En tenant compte de l'écart avec le fil thermocouple placé en vis-à-vis, nous admettons pour être conservatif d'un majorant estimé à 20 µm, soit P1 à ± 10 µm.

L'effet des paramètres physiques est également sensible, on veillera surtout à bien choisir les paramètres en fonction de la température en local et de ces variations (Tableau 1).

Incertitude relative %	P1 ± 10 µm	P1 ± 25 µm	P2 ± 25 µm	λ - 1,4 W/m².K	Cp +20 J/kg.K	λ et Cp
Flux q (W/m²)	**3,38**	**9,44**	**0,01**	**-1,72**	**3,39**	**1,67**
Tp (℃)	**2,74**	**7,67**	**< 0,01**	**-2,19**	**1,10**	**2,56**
h (W/m².K)	**3,87**	**9,68**	**<0,01**	**-1,25**	**3,61**	**2,38**

Tableau 1 : incertitudes de mesure du capteur coef h

L'incertitude globale pour le coefficient d'échange est de l'ordre de 4,5 %.

Câblage et connectique

Les 3 micro-thermocouples paroi (6 fils : 3 chromel et 3 alumel pour un type K) sont placés dans une gaine de protection de type ressort métallique à l'extrémité de laquelle se trouve une prise RS232 compensée dont 6 contacts mâles sont utilisées (Figure 15).

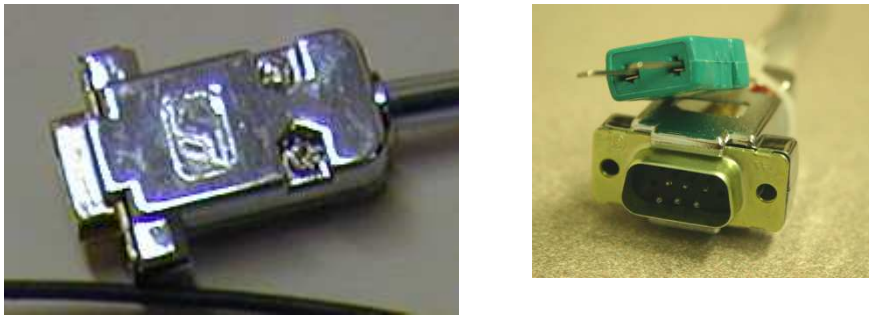


Figure 15 : connectique du coef h - Prise RS232 compensé pour les micro-thermocouples de la paroi

Le thermocouple fluide et son câble d'extension transite le long de la gaine « ressort » fixé par de simples colliers et possède à son extrémité une prise K classique compensée (Figure 16).



Figure 16 : Prise RS232 et la gaine ressort pour protéger les 6 fils TC de 25 µm

Références

Le capteur coef h a été utilisé pendant les programmes expérimentaux FATHERINO et MOTHER (CEA) pour déterminer le coefficient d'échange dans les tés de mélange et également dans l'industrie automobile.

Il a servi à caractériser des chocs chauds et froids pour des expériences en support à Iter et également à qualifier une instrumentation avancée pour EDF.

Publications

Quelques publications parmi les plus significatives sur les méthodes de détermination du coefficient d'échange et des programmes de fatigue thermique FATHER et FATHERINO.

- ICONE 18 2010 (X'ian China): High-Cycle Thermal Fatigue in Mixing Zones: Investigation On Heat Transfer Coefficient And Temperature Fields In PWR Mixing Configurations
(J.P Fontes – O.Braillard – Olivier Cartier)

- ICONE 15 2007 – (Nagoya - Japan) – April 2007 - Thermal fatigue in the mixing tees impacted by turbulent flow at large gap of température – The FATHER experiment and the numerical simulation
(O.Braillard – P.Quéméré – V.Lorch)

- PVP-ICPVT 2006 (Vancouver - Canada) – July 2006 - An advanced mixing tee mock up "the skin of fluid" designed to qualify the numerical LES analyses applied to the thermal evaluation
(O.Braillard – O.Berder – F.Escourbiac – S.Constans)

Tables des matières

Applications 2

Principe physique 4

Algorithme de traitement 5

Méthode temporelle : signaux réels 7

Méthode spectrale 1 : signaux réels 7

Méthode spectrale 2: signaux synchrones 8

Méthode spectrale 3 : identification par une fonction de transfert 8

Montage 10

Conditions d'utilisation 11

Logiciel de traitement Coef h 12

Exemples de résultat 13

Tests de qualification – tests - Incertitudes 16

Vérification de la distance des Thermocouples 16

Vérification de l'hypothèse 1D du flux de chaleur 17

Option : Désatténuation de la température fluide 17

Incertitudes sur les résultats (flux et coefficient d'échange) 18

Câblage et connectique 19

Références 19

Publications 20

Tables des matières 21

Tables des illustrations 21

Tables des illustrations

Figure 1 : le capteur « coefh » avec son système de fixation 2

Figure 2 : capteur coef h dans une paroi 6

Figure 3 : architecture de l'algorithme 9

Figure 4 : capteur coef h dans son bossage (paroi cylindrique tuyauterie) 10

Figure 5 : coupe du capteur avec les micro-thermocouples soudés dans la demi-lune 11

Figure 6 : vue du mini-coef h 12

Figure 7 : exemple de présentation de l'interface IHC de l'algorithme..... 12

Figure 8 : exemple de flux de chaleur et de la température paroi d'un choc froid (échelon négatif) à grand débit dans une conduite 13

Figure 9 : exemple du coefficient d'échange obtenu pour le même choc froid à grand débit en représentation temporelle..... 13

Figure 10 : exemple de coefficient d'échange (normalisé) dans un mélange pour 2 valeurs de Reynolds en représentation spectrale..... 14

Figure 11 : Exemple de DSP des températures mesurées et déduite (Tf, Tf-no att, Tp, P1, P2, P3) .. 15

Figure 12 : Exemple de températures mesurées et déduite (Tf, P1, P2, P3) suite à un échelon de température 16

Figure 13 : réponse expérimentale et comparaison à la réponse théorique 1 D 16

Figure 14 : vérification du flux de chaleur avec le modèle 1D..... 17

Figure 15 : connectique du coef h - Prise RS232 compensé pour les micro-thermocouples de la paroi 19

Figure 16 : Prise RS232 et la gaine ressort pour protéger les 6 fils TC de 25 µm..... 19