

Thermographie infra-rouge

(version du 29 octobre 2012)

1 Présentation et objectifs du TP

Le but de ce TP est d'illustrer expérimentalement les notions vues lors du cours Échanges Thermiques. On s'intéresse dans ce TP aux différents mécanismes de transferts de chaleur entre un corps chaud (une plaque en acier, mince, et chauffée par effet Joule) et son environnement. On travaille sur deux configurations expérimentales : tout d'abord, sans écoulement d'air induit par un moyen extérieur au niveau de la plaque, puis, dans une situation dite de *jet impactant* (un jet d'air à température ambiante impacte sur la plaque). Cette seconde configuration, qui sera vue de manière plus qualitative, se retrouve dans de nombreuses applications industrielles (refroidissement de pièces chauffées dans une turbine à gaz, séchage de textile, etc). Il se pose alors un problème d'optimisation du refroidissement, les paramètres de contrôle étant le débit du jet, sa position relativement à la plaque, et éventuellement l'agencement géométrique d'un ensemble de jets (Cf. §7.7 de *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*).

Pour mesurer la température de la plaque métallique mince (le clinquant) et quantifier ainsi les transferts entre celle-ci et le milieu extérieur, nous allons utiliser une technique de thermographie infra-rouge.

2 Imagerie en thermographie infra-rouge et logiciel d'exploitation

Le système de thermographie infrarouge mis en œuvre dans le cadre de ce TP se compose d'une caméra, de son objectif associé, d'une carte d'acquisition incorporée dans un PC et d'un logiciel de pilotage permettant d'interfacer la caméra et d'obtenir de manière indirecte une cartographie bidimensionnelle et instantanée du champ de température observé.

2.1 La caméra

La caméra utilisée est une caméra JADE MWIR de la société CEDIP. Le capteur qui équipe cette caméra est composé d'une matrice de 320×240 éléments photosensibles (pixels de $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ chacun), refroidis à 77 K et sensibles dans l'infrarouge moyen (longueur d'onde dans la gamme $3 - 5 \mu\text{m}$). Cette caméra est dédiée à la mesure instantanée de champs 2D de température. La cadence de prise de vue maximale est de 150 images par seconde en plein format. L'optique placée devant le capteur est un objectif IR de focale 25 mm (grand angle) et d'ouverture F/2. Les 3 gammes de mesures intégrées dans la caméra sont : $5-45^\circ\text{C}$, $0-60^\circ\text{C}$, et $65-100^\circ\text{C}$. Dans le cadre de ce TP, on choisira la gamme de mesure $0-60^\circ\text{C}$.

2.2 Le logiciel de pilotage de la caméra

Le logiciel Altaïr associé à la chaîne de thermographie est un logiciel relativement convivial qui offre un panel d'outils nécessaires à l'exploitation des champs thermiques étudiés (définitions des paramètres radiométriques, tracés de profils sur les images "live" ou enregistrées, suivi temporel de l'évolution thermique d'une zone, d'un point, calcul de moyenne,...). Outre ces outils d'exploitation des résultats, Altaïr permet le paramétrage de l'acquisition des champs thermiques. On distingue 4 modules :

- *Camera* : via la liaison série RS 232, le logiciel Altaïr permet de paramétrer la caméra infrarouge (fréquence d'acquisition, région d'intérêt, correction de non-uniformité,...).
- *Temperature range* : cette fonction permet de choisir la gamme de mesure de température adéquate.

- *Recorder* : ce module permet de paramétrer et de lancer l’enregistrement des images thermiques (choix du répertoire cible, nom de fichier, nombre d’images ou durée de l’enregistrement).
- *Player* : cette fonction se comporte comme un magnétoscope et permet de relire les séquences acquises avec le module Recorder.

Les modules “Camera” et “Temperature range” sont déjà configurés, il ne faut en aucun cas les modifier.

3 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental se compose de trois éléments distincts.

1. Tout d’abord, l’ensemble caméra infra-rouge et ordinateur pour l’acquisition des images. La caméra infrarouge est positionnée à l’aplomb du clinquant, à une distance d’environ 60 centimètres de celui-ci. La mise au point de l’optique sur le clinquant a été effectuée et ne sera pas modifiée au cours du TP. De manière plus générale, **aucune manipulation ne sera à effectuer sur la caméra**. Elle est entièrement contrôlée par ordinateur, via le logiciel Altaïr.
2. Le clinquant en acier, de dimensions $L = 36.7 \text{ cm} \times l = 30.3 \text{ cm}$, est chauffé par effet Joule. Le clinquant a été peint en noir à l’aide d’un spray de peinture (émissivité $\epsilon \approx 0.94$). L’ampérage du courant qui traverse le clinquant (dont la résistance électrique R vaut 0.019Ω) est fixé par une alimentation stabilisée. Pour changer la puissance dissipée par effet Joule, on joue sur l’intensité du courant. On travaillera sur toute la gamme accessible par ce type d’alimentation, c’est-à-dire de $I = 0 \text{ A}$ à $I = 50 \text{ A}$. L’alimentation est également pilotée par ordinateur via une application de type Testpoint. Noter que la tension aux bornes de l’alimentation stabilisée restera toujours inférieure à 2 V , même pour les plus grandes intensités utilisées.
3. Enfin, le dispositif de soufflerie. Le jet d’air impacte la face inférieure du clinquant. La buse (diamètre en sortie $D = 1.8 \text{ cm}$) est fixée sur une crémaillère ce qui permet de fixer la distance d’impact H (entre la buse et le clinquant). L’alimentation en air est assurée par le réseau d’air comprimé. Une valve permet de contrôler le débit d’air Q , qui est par ailleurs mesuré avec un débitmètre. Dans le cadre du TP, on se limitera à des distances buse-clinquant telles que le rapport H/D soit compris entre 2 et 8. Le débit sera varié dans la gamme $Q = 3 - 12 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$.

4 Énoncé

Avant de commencer les mesures, il convient de bien appréhender les subtilités de la mesure par thermographie infra-rouge. Pour cela, répondre aux questions suivantes.

- 1) Quel est le principe de la mesure par thermographie infra-rouge ? En quoi est-ce une mesure indirecte de la température ?
- 2) Comment le milieu extérieur peut-il influencer cette mesure ?
- 3) Quels sont les points forts de la thermographie infra-rouge, par rapport aux autres techniques de mesure de température que vous connaissez ?

4.1 Plaque sans jet

Dans un premier temps, nous allons nous intéresser au cas où la plaque n’est pas soumise au jet impactant. Le but de cette partie est de mesurer un coefficient d’échange convectif entre la plaque et le milieu extérieur et de comparer ce résultat à celui issu des corrélations empiriques disponibles dans le livre *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*.

4.1.1 Régime stationnaire

- 4) Par quels mécanismes la plaque chauffée échange-t-elle de la chaleur avec le milieu environnant ? Écrivez le bilan thermique reliant la température de la plaque T_p à la puissance surfacique

de chauffe P_s (définie comme étant RI^2/S où $S = L \times l$).

5) Nous commençons à présent les expériences. Fixez l'intensité de l'alimentation stabilisée à 50 A et calculez la puissance surfacique dissipée par effet Joule. Attendez que la température de la plaque se stabilise et observez le champ de température sur la plaque. Quelles sont vos remarques concernant l'homogénéité spatiale de celui-ci? Sur son évolution temporelle en un point donné? Nous allons décrire la température du clinquant par une température moyenne T_p . Cela vous semble-t-il raisonnable? Mesurer T_p pour cette valeur de P_s .

6) Faites varier l'intensité du chauffage par effet Joule. Relevez la température de la plaque pour chaque nouvelle valeur de P_s (faire dix points en tout). Reportez dans un tableau les valeurs de T_p , P_s , q_{rad} et q_{cv} , où q_{rad} est le flux de chaleur échangé par rayonnement et q_{cv} le flux de chaleur échangé par convection.

Par la suite, on essaiera d'être quantitatifs! Les données numériques nécessaires pour les applications numériques sont données en page 4.

7) Comparez l'importance relative des différents termes apparaissant dans le bilan thermique, dans notre cas expérimental.

8) Déduisez le coefficient d'échange convectif moyen \bar{h}_{cv} entre la plaque et le milieu environnant pour les différents points de mesure. Comment ce coefficient d'échange varie-t-il avec la température?

Pour caractériser les transferts thermiques *convectifs* entre un élément chauffé (ou refroidi) et l'air ambiant, on définit généralement un nombre de Nusselt moyen \overline{Nu} à partir du coefficient d'échange convectif moyen \bar{h}_{cv} : $\overline{Nu} = \bar{h}_{cv}L/\lambda$, avec λ la conductivité thermique de l'air et L une dimension caractéristique du système (dans le cas d'une plaque rectangulaire, le rapport entre l'aire et le périmètre de celle-ci)¹. Des corrélations empiriques disponibles dans la littérature permettent de calculer le nombre de Nusselt en fonction des nombres adimensionnés pertinents, dans des cas particuliers (sur ce point, Cf. le petit rappel de cours en bas de page 4).

9) Comparez vos résultats avec les corrélations fournies dans le livre *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*.

10) Pour finir, vous pouvez calculer le nombre de Biot de notre système : $Bi = \bar{h}_{cv}e_c/k_c$, e_c étant l'épaisseur du clinquant et k_c la conductivité thermique de l'acier, et vérifiez ainsi une des hypothèses utilisées lorsque vous avez établi le bilan thermique.

4.1.2 Régime instationnaire

On s'intéresse maintenant à un régime instationnaire pour lequel la température de la plaque évolue au cours du temps. Pour ceci, on coupe brusquement le courant de chauffe (à l'aide de l'application Testpoint), la valeur initiale de l'intensité étant $I = 50$ A. Un film du clinquant en train de se refroidir, réalisé à l'aide d'Altaïr, permet d'obtenir aisément la courbe $T_p(t)$.

10) Écrivez le bilan thermique puis réalisez l'expérience. Commentez vos résultats concernant $T_p(t)$. En particulier, quelle grandeur caractéristique du système pouvez-vous en extraire? Dans quelle mesure vos résultats confirment-ils ceux obtenus précédemment?

4.2 Plaque refroidie par un jet unique impactant

On passe maintenant au cas pour lequel la plaque est refroidie localement par un jet unique d'air, à la température ambiante.

11) Réglez la distance buse-clinquant de manière à ce que $H/D = 6$. On travaillera avec un courant de chauffe de 50 A. Mesurez le champ de température stationnaire obtenu lorsque le jet impacte à un débit donné (faites cette mesure pour 3 différents débits d'air, la lecture au niveau du débitmètre valant successivement 200, 100 et 50). Dans chacun des cas, relevez une coupe longitudinale du champ de température. Comparez les différentes coupes longitudinales et commentez.

1. voir aussi le rappel en page 4

Toujours en travaillant à $I = 50A$, fixez maintenant le débit de gaz (graduation du débitmètre à 200) et variez le rapport H/D .

12) Observez tout d'abord qualitativement l'allure du profil longitudinal de température lorsque H/D varie dans la gamme $H/D=2-8$. Vous relèverez ensuite ce profil pour les distances buse-clinquant suivantes : $H/D=2, 4, 6$ et 8 . Que remarquez-vous à faible distance d'impact ? Comment expliquer ce phénomène ?

Valeurs numériques et définitions :

- Approximation "corps noir" : $\epsilon = \alpha = 0.94$.
- Constante de Stefan-Boltzmann : $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$.
- Viscosité cinématique de l'air : $\nu = 1.43 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.
- Diffusivité thermique de l'air : $\alpha = 2.24 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.
- Conductivité thermique de l'air : $k_{\text{air}} = 0.026 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$.
- Épaisseur du cliquant : $e_c = 50 \mu\text{m}$. L'épaisseur de peinture varie localement entre 10 et 30 μm .
- Conductivité thermique de l'acier : $k_c = 16.3 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$.
- Densité de l'acier : $\rho_c = 7930 \text{ kg m}^{-3}$.
- Capacité calorifique de l'acier $c_c = 450 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$.
- Coefficient de dilatation thermique d'un gaz : $\beta = \frac{-1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \Big|_P$. Dans notre cas, pour l'air, $\beta = 0.003 \text{ K}^{-1}$.

Rappel : "origine physique" des corrélations donnant le nombre de Nusselt.

L'analyse dimensionnelle du système couplé d'équations constitué de l'équation de Navier-Stokes et de celle décrivant les transferts de chaleur par convection permet d'affirmer que le nombre de Nusselt va s'exprimer en fonction de 3 nombres sans dimensions : les nombres de Reynolds (Re), de Prandtl (Pr), et de Grashof (Gr). En lieu et place du Grashof, on peut utiliser le nombre de Rayleigh : $Ra = GrPr$. On a donc $Nu = f(Re, Pr, Ra) = g(Re, Pr, Gr)$.

Les définitions de ces nombres sans dimensions sont :

$$Re = \frac{u_0 L}{\nu} ; Pr = \frac{\nu}{\alpha} ; Gr = \frac{g\beta(T_p - T_a)L^3}{\nu^2}. \quad (1)$$

Ici, la diffusivité thermique du fluide est notée a et sa viscosité cinématique ν . Dans la définition du nombre de Grashof, g est l'accélération de la pesanteur et β le coefficient de dilatation thermique du gaz.

La détermination de la fonction $f(Re, Pr, Ra)$ est généralement compliquée et ne peut se faire analytiquement que dans des cas simples (pour $Pr \gg 1$ ou $Pr \ll 1$ par exemple). On a donc recours à des corrélations empiriques pour chaque géométrie, le nombre de Nusselt étant en fait un Nusselt moyenné sur la surface de l'élément chauffant considéré.