Méthode Flash-Laser

On considère une pièce cylindrique de rayon r, de conductivité thermique λ, de capacité thermique massique c, de masse volumique ρ et d'épaisseur e.

1. Un suppose d'abord l'épaisseur e très petite de façon à pouvoir supposer la température uniforme $T(t)$ au sein de la pièce à un instant donné. La pièce est chauffée uniformément par un source de puissance P mise en route à l'instant $t = 0$, instant auquel la température intérieure T initiale vaut T_0, température de l'extérieur.

   a. Établir l'équation différentielle vérifiée par la température T de la pièce en considérant que le flux thermique des pertes conducto-convectives est modélisé par une loi de Newton de la forme $P_{th} = h(T - T_0)S$, h est le coefficient d'échange et S la surface de la pièce.

   b. En déduire l'expression de la température T de la pièce en fonction du temps en introduisant un temps caractéristique τ.

   c. On suppose que le chauffage s'effectue pendant une durée t_0 très inférieure à τ. En déduire une expression approchée de la température sur l'intervalle de temps $[0, t_0]$. Quelle est la valeur maximale $T_{\max}$ atteinte par T ?

   d. Donner ensuite l'expression de T sur l'intervalle $[t_0, \infty]$.

   e. En supposant que $\forall t_0$, $Pt_0 = E$ (constant), que devient l'allure de la température si $t_0 \to 0$?

2. On s'intéresse désormais à la conduction axiale au sein de la pièce.

   a. Établir l'équation de la diffusion thermique (pour $T(x, t)$) au sein du solide.

   b. En utilisant le modèle de Parker (voir l'annexe), donner l'expression de la température réduite sur la face arrière de la pièce définie par $u(t) = (T(e, t) - T_0)/(T_{\max} - T_0)$. Approcher cette expression pour les instants supérieurs au temps caractéristique de la diffusion (d'après le modèle de Parker).

   c. Compléter le script PYTHON fourni pour donner les représentations graphiques analytique exacte et approchée de la température réduite.

   d. En déduire que le temps de demi-montée $t_{1/2}$ (pour lequel u vaut $1/2$) permet de déterminer la diffusivité thermique du matériaux.

3. Étude du Dural.

   a. À l'aide de l'expérience de Balageas (détaillée dans l'annexe), estimer la diffusivité D du Dural.

   b. Comparer les temps caractéristiques des pertes convectives (pour $h = 5\,\mathrm{W{\cdot}K^{-1}{\cdot}m^{-2}}$) et de la conduction au sein de la pièce. Que penser de l'hypothèse consistant à négliger les pertes convectives ?

   c. Estimer l'énergie apportée par la source à la face avant.

   d. Quelles critiques peuvent être formulées concernant le modèle de Parker ?

Il sera accordé une grande importance aux qualités d'exposition.
Le candidat est invité, dès le début de son passage au tableau, à présenter le sujet préparé de manière ordonnée et argumentée.

Annexe

Méthode de Parker

La technique flash laser a été développée par Parker (1960) afin d'obtenir des mesures rapides de la conductivité thermique d'échantillons de petites dimensions. Elle consiste à envoyer une impulsion très brève sur la face avant d'un échantillon cylindrique de faible épaisseur. Ensuite, l'analyse de l'évolution de la température sur la face arrière en fonction du temps permet la détermination de la diffusivité thermique. Le Modèle de Parker consiste à considérer un disque parfaitement isolé d'épaisseur e et de rayon r. Initialement, l'échantillon reçoit une impulsion énergétique de très courte durée, l'absorption de l'énergie s'effectue en surface de façon uniforme. Les pertes convectives sont supposés nuls sur toutes les faces et le flux thermique se propage parallèlement à l'axe optique. La résolution de l'équation de la chaleur dans ces conditions s'obtient par une méthode de séparation de variables ou à l'aide de la transformation de Laplace. À une profondeur z donnée de l'échantillon, la solution s'écrit comme suit où D est la diffusivité thermique du matériau :

$$T(z,t) = T_0 + (T_{\max} - T_0)\left(1 + 2\sum_{n=1}^{\infty} \cos\left(\frac{n\pi z}{e}\right) \exp\left(\frac{-n^2\pi^2 Dt}{e^2}\right)\right)$$

La mesure des variations de température en faces avant ou arrière, peut être réalisée à l'aide de thermocouples ou de détecteurs de rayonnement infrarouge. Les thermocouples sont utilisés en général pour les basses températures et des matériaux épais. Cependant pour l'étude en régimes transitoires rapides, ou dans les conditions de hautes températures, l'utilisation de détecteurs infrarouges est préconisée. Le choix du détecteur s'effectuant suivant la gamme de température de travail. La **figure 1** donne un exemple de montage :

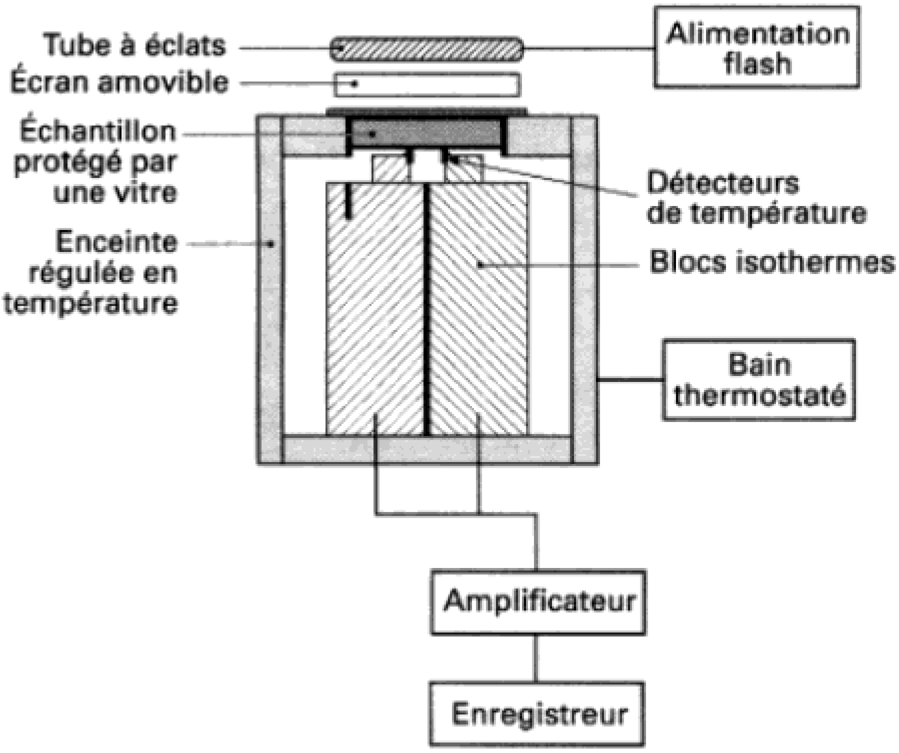

Figure 1 Exemple de montage expérimental de méthode Flash-Laser

Étude du Dural

Le Dural (ou duralumin ou encore duraluminium) est un alliage d'aluminium et de cuivre utilisé en aéronautique en raison de sa grande résistance aux contraintes et de sa plus faible densité que l'acier. Sa densité n'est que de 2,8. Sa capacité thermique massique est $c = 880\ \mathrm{J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}}$.

Des mesures de diffusivité en faces arrière ont été réalisées (Daniel Balageas, ONERA Département Matériaux et Structures) sur une plaque de Dural, illuminée par 2 lampes flash créant des illuminations de 4 ms (maximum de l'intensité à moins de 2 ms) avec au niveau de l'échantillon en face avant une énergie surfacique ϵ. La température surfacique était enregistrée par une caméra Jade LW Cedip à la fréquence image de 200 Hz. Une mesure en face arrière est faite afin de disposer d'une valeur à priori fiable de la diffusivité (méthode de Parker). Deux thermogrammes sont présentés : la température d'un pixel unique (courbe grise) et celle de la moyenne d'une zone circulaire centrale de 194 pixels, centrée sur ce pixel. La moyenne d'une zone de 194 pixels conduit à un rapport signal sur bruit de 62.

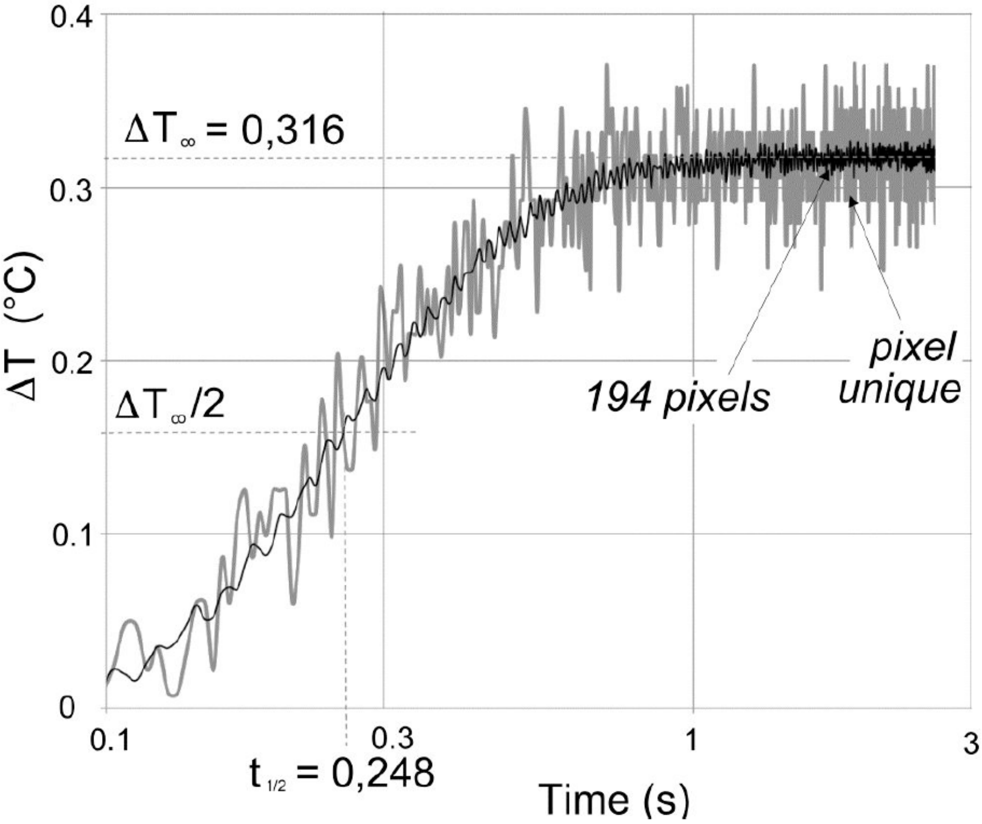

Figure 2 Thermogramme d'une plaque de Dural
de surface $S = 0{,}01\ \mathrm{m}^2$ et d'épaisseur $e = 1\ \mathrm{cm}$