

Evaluation non destructive par thermographie infrarouge pulsée

Jacky Bresson, Pascal Rathier, Martine Grisenti

IUT de Perpignan, département G.I.M.

Ch. de la Passio Vella, BP 79905 - 66962 PERPIGNAN Cédex 9

E.mail : bresson@univ-perp.fr

Sections de rattachement : 60
Secteur : Secondaire

***Résumé.** La thermographie active consiste à provoquer sur l'échantillon visé, l'apparition d'un gradient thermique grâce à une stimulation thermique extérieure. Cette technique permet de faire du contrôle non destructif (détection de défauts, inclusions, tâches de rouille, délaminage,...) ou de l'évaluation non destructive de grandeurs physiques de l'échantillon. La méthode flash, développée dans ce travail, est basée sur l'excitation d'un échantillon par un flash thermique et l'analyse de la réponse en température. La diffusivité thermique, paramètre physique caractéristique de l'aptitude du matériau à diffuser la chaleur, peut ainsi être déterminée à partir de cette méthode.*

***Mots clés.** Thermographie infrarouge pulsée, méthode flash, diffusivité thermique, traitement d'images thermiques, évaluation non destructive, contrôle non destructif.*

1. Introduction

La thermographie infrarouge devient une technique financièrement abordable et prisée en maintenance prévisionnelle. Elle permet de prévoir d'éventuels dysfonctionnements par l'apparition de points « chauds » dans le champ thermique rayonné par les systèmes en fonctionnement. La méthode est facile à mettre en œuvre, il suffit de viser un process et de relever le rayonnement de surface des objets. C'est le « contraste thermique » de ces corps avec leur environnement que l'on détecte et visualise. On parle alors de **thermographie passive**. Cette méthode donne de bons résultats lorsqu'il s'agit de déceler un changement d'état thermique relatif à un défaut naissant mais ne donne aucune indication sur le type ou les caractéristiques du défaut (position exacte, dimensions, ...). La présence de défauts non débouchants tels que criques, délaminages, inclusions ou points d'oxydation est difficilement décelable car aucun contraste thermique n'apparaît en surface. Leur détection ou évaluation n'est

possible qu'en stimulant thermiquement la zone considérée. On parle alors de **thermographie active**. Nous présentons dans cet article une application, développée en TP avec les étudiants, de **la thermographie pulsée ou « méthode flash »** ainsi appelée parce que la stimulation thermique repose sur la production d'une impulsion de chaleur de très courte durée.

2. Approche théorique

En considérant une impulsion de chaleur la plus courte possible, si le flux thermique est uniforme sur la face avant de l'échantillon (fig. 1), les pertes négligeables (cas adiabatique) et les propriétés thermophysiques du matériau constantes pendant l'exposition, alors la réponse en température à une profondeur x donnée s'obtient par la relation [1] :

$$T(x,t) = \frac{Q}{\rho C e} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos\left(\frac{n\pi}{e}x\right) \exp\left(-\frac{n^2\pi^2 a t}{e^2}\right) \right] = T_{lim} f\left(\frac{x}{e}, \frac{a t}{e^2}\right) \quad (1)$$

avec :

- a diffusivité thermique
- e épaisseur de l'échantillon
- Q énergie absorbée par la face thermiquement stimulée
- ρ masse volumique
- C capacité thermique
- t temps
- T température

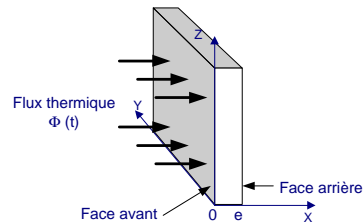


Figure 1. Principe de la méthode

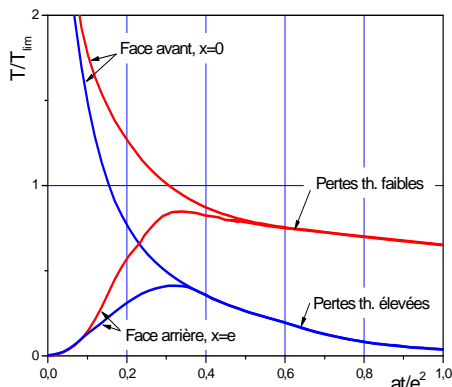


Figure 2. Réponse temporelle de la température sur la face avant et arrière d'un échantillon d'épaisseur e et de diffusivité a , à une impulsion flash en face avant (cas avec pertes thermiques).

2.1 Méthode du contraste maximum

En **face avant** ($x=0$), le thermosignal présente un point singulier inexploitable en début d'illumination thermique. Par contre, la décroissance de la température en fonction du temps réduit at/e^2 peut renseigner l'expérimentateur sur la présence, la profondeur du défaut ou bien donner une indication sur les propriétés thermiques du matériau, notamment la diffusivité. La présence de défauts modifie localement la pente du régime transitoire (fig. 3a).

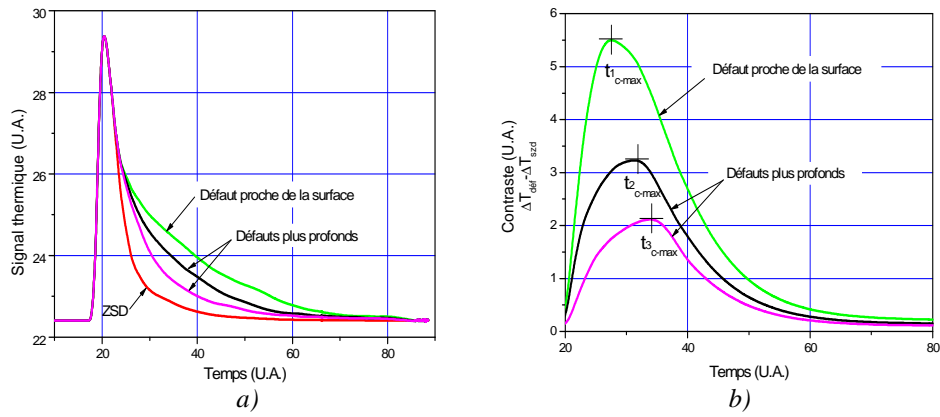


Figure 3. Evolution de la température (a) et du contraste (b) pour différents défauts dans un matériau.

L'étude de ce régime permet de caractériser les défauts par la **méthode du contraste maximum**. Cette méthode requiert la connaissance d'une zone sans défaut (ZSD) sur la face avant de l'objet testé. Le contraste normalisé C pour chaque pixel (i,j) de l'image thermique (temps t) est défini par :

$$C(i, j, t) = [T_{DEF}(i, j, t) - T_{DEF}(i, j, t = 0)] - [T_{ZSD}(i, j, t) - T_{ZSD}(i, j, t = 0)] = \Delta T_{DEF} - \Delta T_{ZSD} \quad (2)$$

avec : $T_{ZSD}(t)$: température de la zone sans défaut au temps t
 $T_{DEF}(i,j,t)$: température du point (i,j) à l'instant t .

Les zones de l'échantillon analysé ayant les mêmes propriétés thermiques atteignent leur contraste maximum au même moment, donc ont le même t_{c-max} . Par contre, les zones de l'échantillon ayant des défauts vont atteindre leur contraste maximum à un autre instant (fig. 3b). Pour chaque courbe, on extrait l'instant t_{c-max} après le début de l'expérience où le contraste est maximum. Or, on sait [2] en première approximation que le temps t_{c-max} nécessaire à l'observation d'un défaut après le début de l'expérience est lié à la diffusivité thermique a du matériau par la relation :

$$t_{c-max} \approx \frac{d^2}{a}$$

2.2 Méthode d'estimation de Parker

La mesure de l'évolution de la température en **face arrière** $x=e$ permet de confirmer les résultats précédents. Dans ce cas, en considérant le temps de « demi-montée » $t_{1/2}$ du thermosignal (méthode simple d'estimation de Parker), on estime la valeur de la diffusivité par la relation :
$$a = \frac{0,139 d^2}{t_{1/2}}$$

3. Montage expérimental

Le dispositif expérimental (fig. 4) comporte deux puissantes lampes orientables de 1kW chacune, qui excitées pendant un temps très court (de 0,1 à 3s) produisent un flash thermique homogène sur la face avant de l'échantillon. Quant à la face arrière, une seule lampe de 1 kW assure l'illumination thermique. La caméra thermique (Inframetrics 760) avec son unité de commande vise la face avant de l'échantillon sous test. Pour les besoins de l'expérience, des défauts artificiels non débouchants respectivement à la distance **di** de la surface avant ont été réalisés (fig 5) sur deux types de matériaux présentant des propriétés thermiques différentes (tab. 1). Chaque plaque d'échantillon est peinte en noir mat pour assurer une émissivité la plus proche de 1.

Caractéristiques à 20°C	Densité kg m ⁻³	Capacité thermique volumétrique 10 ⁻⁶ J m ⁻³	Conductivité thermique W m ⁻¹ K ⁻¹	Diffusivité thermique 10 ⁻⁶ m ² s ⁻¹
Aluminium	2700	2,376	237	99,75
Téflon PTFE	2200	2,200	0,25	0,11

Tableau 1. Caractéristiques thermiques de l'aluminium et du téflon.



Figure 4. Montage expérimental

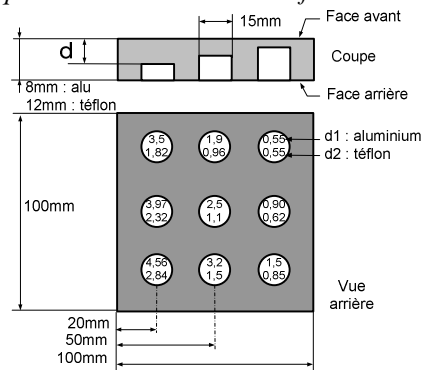


Figure 5. Echantillon testé

Dès le déclenchement des lampes, la caméra thermique Inframetrics 760 enregistre une série d'images thermiques (25 images par seconde) de la surface avant de l'échantillon. La durée d'acquisition dépend de la méthode d'analyse des résultats (flash en face avant ou arrière). Le dispositif est complété par la présence de deux micro-

ordinateurs, l'un servant au pilotage de la caméra infrarouge, l'autre assure l'acquisition et le traitement de la séquence vidéo thermique au moyen du logiciel LABVIEW.

4. Exploitation des résultats

De nombreux essais ont été réalisés sur les deux types d'échantillons. A chaque fois, la réponse temporelle de la température de la face avant a été relevée suite à l'illumination de la face avant et de la face arrière.

4.1 Visualisation des défauts

Le relevé du thermogramme face avant pour les deux types de matériaux, après un flash avant et arrière d'une durée de 3s, permet la visualisation des défauts comme l'indiquent les figures 6a-d.

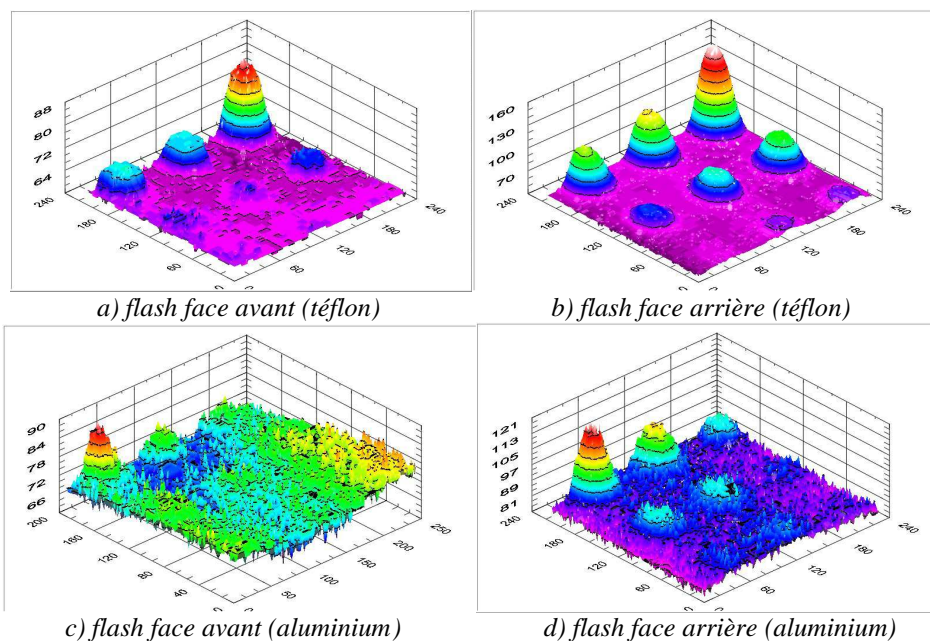


Figure 6. Visualisation des défauts en 3D sur échantillon téflon et aluminium (flash 3s)

Du fait d'une conductivité et d'une diffusivité très faibles l'échantillon en téflon a une réactivité thermique assez lente, ce qui autorise des largeurs d'impulsions relativement grandes c'est à dire des énergies thermiques élevées et donc des résultats assez probants. Le cas de l'aluminium est plus délicat. En effet, ce matériau réagissant très rapidement aux perturbations thermiques (diffusivité 1000 fois plus grande),

nécessite des excitations thermiques de très courtes durées (pour éviter de superposer la réponse en température avec l'impulsion thermique si celle-ci est trop large) donc d'énergie insuffisante pour une visualisation optimale des défauts.

Le résultat le plus probant est donc obtenu sur le téflon illuminé en face arrière où l'on peut mettre en évidence les défauts les plus profonds sous la surface.

4.2 Détermination des caractéristiques thermiques des matériaux

Bien que qualitativement la différence de comportement entre les deux matériaux soit visible (résultats précédents), l'obtention de résultats quantitatifs n'a pas été possible pour l'aluminium avec ce dispositif expérimental. Cette difficulté provient essentiellement d'une trop grande diffusivité de l'aluminium qui, lui conférant une grande réactivité thermique, ne permet pas d'apprécier correctement les différents t_{c-max} (méthode flash avant) ou $t_{1/2}$ (méthode flash arrière) tout du moins avec les moyens dont nous disposons. Seuls les résultats concernant le téflon sont présentés.

4.1.1. Illumination thermique en face avant

Dans ce cas, la face avant est soumise à un flux thermique de durée 1 seconde. Le front d'onde en se propageant rencontre les différents défauts qui, comme autant d'obstacles à la propagation, vont rayonner de manière différente en direction de la surface. L'enregistrement de la séquence thermique vidéo est exploité par le logiciel LABVIEW. Ce dernier permet de tracer le profil thermique au cours du temps de plusieurs pixels de l'image thermique (fig. 7a). Comme le prévoit la théorie, après excitation thermique, le retour à l'équilibre thermique s'effectue de manière différente selon l'importance des défauts sous la surface et ceci d'autant plus lentement que le défaut est profond. Dans tous les cas, l'ensemble des courbes tend vers une courbe asymptotique correspondant à la réponse en température de la zone sans défaut (ZSD).

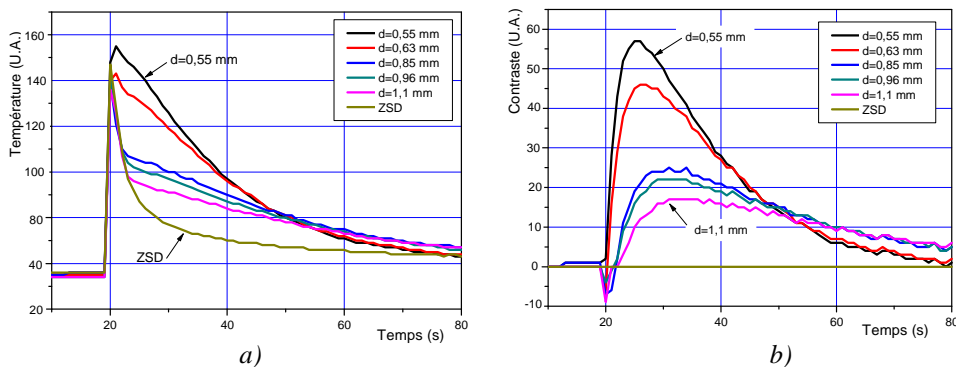


Figure 7. Profil thermique a) et Contraste thermique b) des premiers défauts (Téflon - flash face avant=1s)

Ce même logiciel calcule le contraste thermique (fig. 7b) de ces mêmes défauts au cours du temps et détermine, pour chacun des défauts, le temps t_{C-max} où le contraste passe par un maximum

L'exploitation de ces résultats en fonction du carré de la profondeur des défauts (fig. 8) permet de déterminer la diffusivité du matériau. On retrouve bien une relation quasi-linéaire entre t_{C-max} et d^2 . La pente de la droite restituée la diffusivité thermique du matériau soit : $a=0,098.10^{-6} m^2/s$

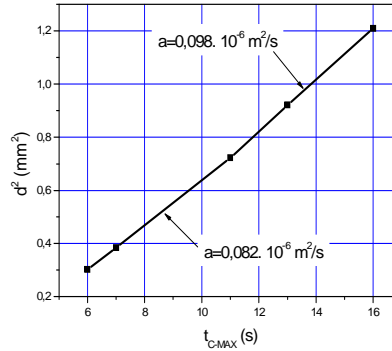
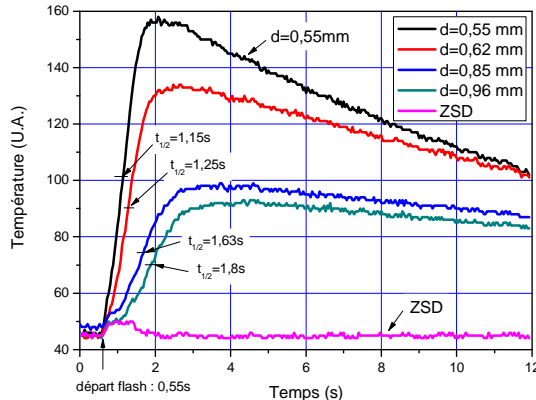


Figure 8. Diffusivité thermique du téflon (flash face avant=1s)

4.1.2. Illumination thermique en face arrière

Une impulsion thermique de 1s est appliquée en face arrière. Le rayonnement thermique résultant de la face avant est enregistré par la caméra infrarouge. Le même logiciel LABVIEW assure la décompression, le traitement des thermogrammes et le tracé des profils thermiques des différents défauts (fig. 9). On remarque que ces courbes présentent un temps de montée d'autant plus grand que le défaut est profond avec un échauffement maximum corrélativement plus faible. L'utilisation de la méthode de Parker permet en première approximation, à partir du temps de demi-montée après le départ flash, d'estimer la diffusivité thermique du téflon (tab. 2).



d (mm)	$t_{1/2}$ (s)	a ($10^{-6} m^2/s$)
0,55	0,6	0,070
0,62	0,7	0,076
0,85	1,08	0,093
0,96	1,25	0,102
a_{moy} =		0,085

Tableau 2. Diffusivité thermique du téflon obtenue par la méthode de Parker (flash face arrière 1s)

Figure 9. Profil thermique des premiers défauts (Téflon – flash arrière=1s)

4.1.3. Discussion

Les résultats de la diffusivité thermique du téflon obtenus par la méthode du contraste maximum ($a=0,098.10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) et par la méthode de Parker ($a=0,085.10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) semblent cohérents avec la valeur attendue ($a=0,11.10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ – voir tableau I). Dans cette expérience, nous n'avons pas tenu compte de l'influence de la largeur, non négligeable, de l'impulsion thermique de 1s. Cette influence est d'autant plus importante que les défauts sont proches de la surface.

5. Conclusion

Par une augmentation du contraste thermique, la thermographie pulsée ou méthode flash traitée dans cet article présente l'avantage d'accéder à des défauts invisibles par d'autres méthodes. De plus, il est possible de déterminer certaines propriétés thermiques des matériaux (diffusivité et conductivité thermiques). Seuls les résultats obtenus sur le téflon sont présentés et exploités par la méthode du contraste maximum lorsque l'échantillon est illuminé sur la face avant et par la méthode de Parker lorsque le flash thermique est appliqué en face arrière. Dans les deux cas, les résultats obtenus sont cohérents avec les données théoriques.

Bibliographie

BALAGEAS D. « La thermographie infrarouge, outil de métrologie, de caractérisation et de contrôle, aux multiples applications » *Service de formation continue et développements ENS-Cachan*, Tome 1 et 2, 12-14 juin 2001.

GAUSSORGUES G. « La thermographie infrarouge, principes technologies et applications » *Technique et documentation Lavoisier*, 3^{ème} édition, 1989, p.539

HAY B., FLITZ J.E., BATSALE J.C. « Mesure de la diffusivité thermique par la méthode flash » *Techniques de l'Ingénieur*, R2955, mars 2004, p.12