

## Contribution à la caractérisation et à la détection des défauts dans les matériaux par analyse thermique avec contact

A. Kabouri<sup>1,3</sup>, A. Khabbazi<sup>2</sup>, H. Youlal<sup>3</sup>

<sup>1</sup> LASTIMI, Université Mohamed V-Rabat, EST Salé, 227 Avenue Prince Héritier Sidi Mohammed, Salé, Maroc

<sup>2</sup> LEME, Université Mohamed V-Rabat, EST Salé, 227 Avenue Prince Héritier Sidi Mohammed, Salé, Maroc

<sup>3</sup> UFR en Automatique et Traitement de l'Information, Faculté des Sciences de Rabat, BP 1014 – Rabat Maroc

[akabouri@hotmail.com](mailto:akabouri@hotmail.com) - [abdelhamidkab@hotmail.com](mailto:abdelhamidkab@hotmail.com) - [youlal@fsr.ac.ma](mailto:youlal@fsr.ac.ma)

**Résumé :** Dans cet article, une contribution expérimentale à la détection et à la caractérisation des défauts dans les milieux homogènes par thermographie est présentée. Il s'agit principalement de la détection des défauts par la méthode flash transitoire en mode transmission, utilisée pour déterminer la diffusivité thermique des matériaux. Un dispositif expérimental de mesure par thermographie avec contact, a été conçu et réalisé. L'instrument de mesure comprend un capteur réalisé à partir des thermocouples de type K pour suivre l'évolution temporelle de la température de la face arrière de l'échantillon à tester. Le matériau étudié est un échantillon homogène de bois massif où on a créé plusieurs défauts artificiels de profondeurs variables. Les thermogrammes locaux réponses mesurés simultanément en plusieurs points de la face arrière, fournis des informations importantes liées à la taille et à la nature thermophysiques des défauts détectés. En effet, la comparaison des écarts correspondent aux maximums des contrastes thermiques ainsi que la mesure du champ de la diffusivité thermique de la face arrière permettent d'établir un système de détection et de caractérisation des défauts dans les matériaux.

**Mots clés :** Transfert Thermique, Méthode Flash, Capteur de contact, détection de défauts.

### 1. Introduction

Les essais non destructifs par les techniques de la thermographie ont connu un essor considérable ces dernières années. Ils ont devenu de plus en plus populaires dans le domaine de l'inspection des matériaux et des structures. De nombreuses approches basées sur les techniques de thermographie incluant les algorithmes de traitement des données et les implémentations pratiques sont documentées dans [1-5]. Leurs performances sont largement étudiées dans divers cas afin d'inspecter des matériaux contenant différentes anomalies de surface ou interne telles que les délaminages, les fissures, les infiltrations d'air, corrosions [6-9]. Dans les procédés de thermographie active, le matériau à inspecter est excité avec une source de chaleur et les variations de température sur ses surfaces sont surveillées pendant le chauffage ou le refroidissement. L'analyse des processus de chauffage et de refroidissement pendant et après l'excitation est aujourd'hui une technique bien établie de caractérisation thermo-physique et de contrôle non-destructif des matériaux.

L'objectif visé dans cette étude est la caractérisation des défauts dans les matériaux par la méthode flash transitoire en mode transmission, généralement utilisée pour déterminer la diffusivité thermique des matériaux. Cette méthode initialement introduite par Parker [10] et améliorée par Degiovanni [11] est aujourd'hui utilisée comme un outil standard pour la caractérisation thermophysiques des matériaux. En effet, on excite la face avant du matériau à inspecter à l'aide d'une brève impulsion photo-thermique de forte puissance, et par la suite, on suit les variations de température de la face arrière. L'analyse des thermogrammes locaux mesurés simultanément en tous points de la face arrière, permet de détecter et de localiser les zones présentant des hétérogénéités, et de fournir des informations importantes liées à la taille et à la nature thermophysiques des défauts détectés. Nous avons adopté le principe de mesure de la température avec contact en réalisant un capteur de température surfacique à partir d'une matrice de quarante-neuf thermocouples K de type Chromel-Alumel assemblés sous la forme d'une matrice de sept lignes par sept colonnes [12-13].

Considérons un échantillon à inspecter qui est initialement à une température ambiante  $T_a$  uniforme, c.à.d. que les températures de ses faces avant et arrière sont égales à  $T_a$ . Ensuite, cet échantillon est exposé sur sa face

avant à une source de chaleur uniforme de courte durée. Deux cas peuvent être considérés, en fonction des caractéristiques thermophysiques de l'échantillon. Le premier cas suppose que l'échantillon à inspecter est constitué d'un matériau homogène sans aucun défaut. Après un certain temps, la température de sa face arrière commence à augmenter jusqu'à sa valeur maximale  $T_{max}$  soit atteint. Cette valeur  $T_{max}$  dépend de l'apport calorifique total et de la capacité thermique de l'échantillon. Le temps  $t_{max}$  correspond à  $T_{max}$  dépend de l'épaisseur de l'échantillon et de la diffusivité thermique  $\alpha_h$  du matériau qu'il le constitué. Le second cas suppose qu'un défaut est enterré à l'intérieur du matériau homogène. De nouveau, deux cas peuvent survenir en fonction de la valeur de la diffusivité thermique du défaut  $\alpha_d$  par rapport à celle du matériau  $\alpha_h$ . Le premier correspond à  $\alpha_d < \alpha_h$ . En raison de sa diffusivité thermique plus faible, le défaut agit comme un obstacle à la propagation de la chaleur, et la distribution de la température sur la face arrière, présente toujours un minimum dans la zone du défaut. Le second correspond à  $\alpha_d > \alpha_h$ . En raison de sa diffusivité thermique plus grande, la transmission de la chaleur est importante dans la zone du défaut, et la distribution de température sur la face arrière, présente toujours un maximum. Dans les deux cas de  $\alpha_d < \alpha_h$  ou  $\alpha_d > \alpha_h$ , la température dans la zone du défaut atteint son écart maximal par rapport à la zone homogène à l'instant  $t_{max}$ . Après  $t_{max}$ , l'équilibre thermique de la face arrière reviendra lentement vers la température ambiante.

Dans cet article nous présentons les résultats obtenus pour la détection et la caractérisation des défauts en réalisant des essais en laboratoire. Nous avons mesuré simultanément les thermogrammes dans la face arrière par la méthode flash en utilisant un capteur surfacique de contact réalisé à partir des thermocouples de type K [12]. La détection des défauts était obtenue par calcul des écarts de la température lorsque les contrastes thermiques atteignent ses écarts maximaux. Dans ce contexte, pour étudier la faisabilité de la détection et la caractérisation de défauts, nous avons préparé des échantillons tests en bois massif, dans lesquels on a créé plusieurs défauts artificiels sous-surfaciques de profondeurs variables et de propriétés thermophysiques différentes à celles du bois utilisé.

## 2. Description du dispositif expérimental en laboratoire

Le dispositif expérimental conçu pour mettre en évidence la présence de défauts est constitué d'un banc de la méthode flash arrière (figure 1.). Il est composé d'une chambre supérieure constituée d'une source chauffante radiative utilisant deux lampes flash à halogène de 1000 W. Cette source sert à exciter l'échantillon à inspecter sur sa face avant. L'élément principal du banc est un capteur surfacique de température de 49 thermocouples de type K monté sous la forme d'une matrice de sept lignes et sept colonnes. Ce capteur placé en contact direct avec la face arrière de l'échantillon, permet de suivre l'évolution de la température de la face arrière et de mesurer simultanément plusieurs thermogrammes locaux pour un seul essai. Ce banc est isolé thermiquement afin de limiter les pertes et les perturbations avec l'environnement extérieur. Un système de contrôle de la température constitué d'un bain thermostaté et un échangeur thermique, est installé dans la chambre inférieure afin d'éviter les perturbations des mesures. Le système est relié à une unité d'acquisition de 60 entrées de thermocouples, liée à un ordinateur pour le traitement.

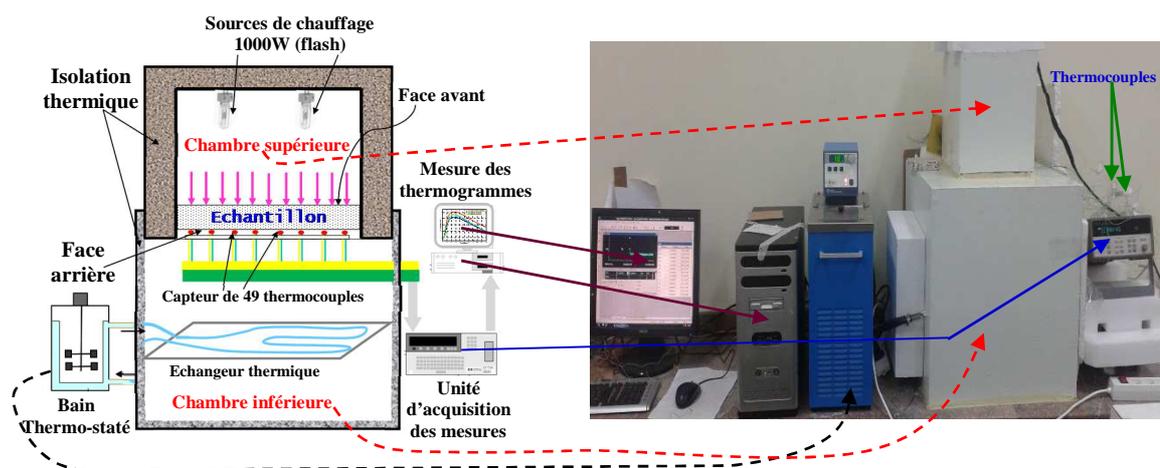


Figure 1 : Schéma de principe et illustration 3-D du banc d'essai

### 3. Modèles théoriques

On a procédé une analyse thermique locale pour la détection des défauts et nous avons considéré que le transfert de chaleur est unidirectionnel suivant la direction verticale  $z$ . Au voisinage d'un point  $(i,j)$  de mesure de la face arrière, l'équation de la chaleur locale s'écrit :

$$\frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha_{ij}} \frac{\partial T_{ij}}{\partial t} \quad (1)$$

où  $\alpha_{ij}$  est la diffusivité thermique locale. Dans le cas d'un matériau homogène,  $\alpha_{ij}$  est constante quel que soit le point de mesure. La présence d'un défaut au voisinage d'un point  $(i,j)$ , influencera sur l'évolution du thermogramme ainsi que sur l'estimation de la valeur de  $\alpha_{ij}$ .

On suppose que toute la face avant de l'échantillon est soumise pendant un temps  $t_0$  très court à un flux radiatif uniforme de densité  $\varphi_0$  et que le coefficient d'échange convectif  $h$  est identique sur toutes les faces de  $l$ . De plus, la température qui règne à l'instant initial  $t = 0$  est uniforme et égale à la température ambiante. Sous ces conditions, la méthode des quadripôles dans l'espace de Laplace, qui fait intervenir les vecteurs de température et flux de chaleur transmis dans l'échantillon s'écrit [14] :

$$\begin{bmatrix} \theta_{ij}(z = 0, p) \\ \Phi(z = 0, p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{ij} & B_{ij} \\ C_{ij} & D_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{ij}(z = e, p) \\ \Phi(z = e, p) \end{bmatrix} \quad (2)$$

où les paramètres  $A_{ij} = \cosh(q_{ij}e)$ ,  $B_{ij} = \frac{\sinh(q_{ij}e)}{\lambda_{ij}Sq_{ij}}$  et  $C_{ij} = \lambda_{ij}Sq_{ij} \sinh(q_{ij}e)$ , dépendent des paramètres locaux de la diffusivité  $\alpha_{ij}$  et de la conductivité  $\lambda_{ij}$ , avec  $q_{ij} = \sqrt{p/\alpha_{ij}}$ .

Dans le cas de la méthode Flash, en combinant toutes les relations aux conditions limites dans l'espace de Laplace, on peut déduire de la relation (2), la température locale au voisinage d'un point  $(i,j)$  de la face arrière:

$$\theta_{ij}(e, p) = \frac{\varphi_0}{p} \frac{(1 - e^{-pt_0})}{C_{ij} + 2A_{ij}h + B_{ij}h^2} \quad (3)$$

Si les paramètres  $\alpha_{ij}$ ,  $\lambda_{ij}$ ,  $h$  et  $\varphi_0$  sont supposés connus, l'expression de la température locale dans l'espace réel peut se calculer en appliquant la méthode de la transformée de Laplace inverse de Stehfest [15] :

$$T_{ij}(e, t) = \frac{\text{Ln}(2)}{t} \sum_{n=1}^N V_n \theta_{ij} \left( e, \frac{n \cdot \text{Ln}(2)}{t} \right) \quad (4)$$

où  $\theta_{ij}$  est la fonction donnée par la relation (3).  $N$  est le nombre de Stehfest et doit être pair. Les coefficients de pondération  $V_n$  ne dépendent que de  $N$ . Dans cette étude, nous avons pris  $N = 10$ . L'objectif visé est l'identification des paramètres inconnus du modèle (3) en minimisant l'erreur quadratique suivante :

$$S_{ij} = \sum_{k=1}^M (T_{ij \text{ mes}}^k - T_{ij \text{ sim}}^k(\beta))^2 \quad (5)$$

où  $M$  le nombre de données expérimentales,  $T_{ij \text{ mes}}$  sont les températures locales mesurées en point  $(i,j)$  de la face arrière et  $T_{ij \text{ sim}}$  ses températures correspondantes estimées à l'aide du modèle des quadripôles à partir du vecteur  $\beta = [\alpha_{ij} \lambda_{ij} h \varphi_0]^T$  regroupant les paramètres à estimer. Ensuite, nous utilisons l'algorithme de Levenberg-Marquardt [16] pour l'identification des paramètres du vecteur  $\beta$  susceptibles de minimiser l'écart entre les thermogrammes expérimentaux locaux mesurés en plusieurs points  $(i,j)$  de la face arrière et les expressions théoriques correspondantes des températures.

En outre, les thermogrammes expérimentaux sont utilisés pour calculer les valeurs expérimentales des diffusivités thermiques locales par le modèle de Parker [10] :

$$\alpha_{ij} = 0.139 \frac{e^2}{t_{ij \ 1/2}} \quad (6)$$

où  $t_{ij \ 1/2}$  le temps correspond à la demi-montée du thermogramme  $ij$  et  $e$  l'épaisseur de l'échantillon. Une comparaison entre les valeurs obtenues à l'aide du modèle de Parker et le modèle complet (3) sera présentée dans la section suivante (tableaux 1 et 2)

## 4. Résultats expérimentaux et discussion

### 4.1. Préparation des échantillons d'essais

Afin de valider expérimentalement le système décrit dans cet article, nous avons réalisé une série d'expérimentation sur un échantillon homogène de bois massif de masse volumique  $\rho = 493 \text{ Kg.m}^{-3}$ , et de dimension  $10 \times 10 \times 2 \text{ cm}^3$  (d'épaisseur  $e=2 \text{ cm}$ ). Huit défauts internes artificiels ( $D_1$  à  $D_5$ ) de formes cylindriques de mêmes diamètres égaux à 6 mm, ont été créés dans des zones localement connues (Figure 2).

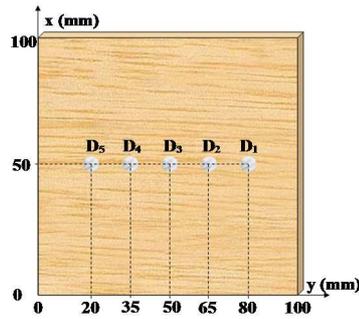


Figure 2 : Position des défauts artificiels dans le plan oxy de la face arrière

La figure 3 résume les grandes étapes de préparation des échantillons de bois pour obtenir des défauts artificiels cachés.

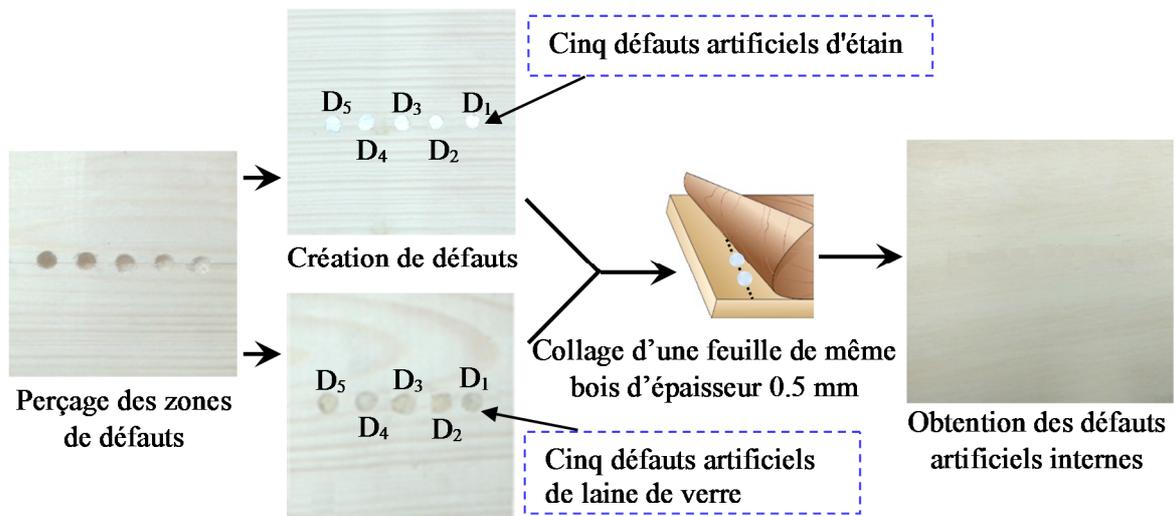


Figure 3 : Les étapes de préparation des échantillons pour obtenir des défauts artificiels cachés

Les défauts créés, ont des profondeurs variables et des propriétés thermophysiques différentes (Figure 4). Deux types de défauts ont été créés pour effectuer des tests de détection. Le premier est de l'étain d'une conductivité thermique  $\lambda_{tin}=66.6 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}$  supérieure à celle du bois  $\lambda_{wood}= 0.14 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}$  et le second est de la laine de verre de conductivité thermique  $\lambda_{glasswool}=0.039 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}$  inférieure. Dans ce cas, la transmission de la chaleur dans les zones de défauts d'étain est plus rapide que dans la zone homogène du bois. Par contre, il est moins rapide dans les défauts constitués par la laine de verre.

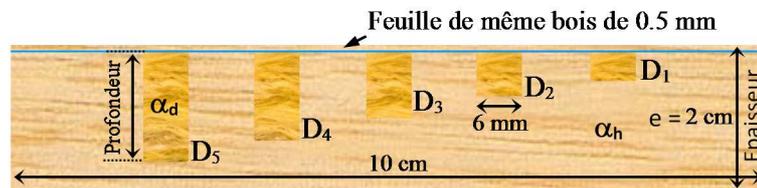


Figure 4 : Coupe transversale de l'échantillon avec les différentes dimensions

La figure 5 illustre le phénomène de transmission de la température à différentes profondeurs dans l'échantillon. La distribution de la température est uniforme dans toutes les parties homogènes à l'exception des zones de défauts où la transmission de la chaleur a subi un changement.

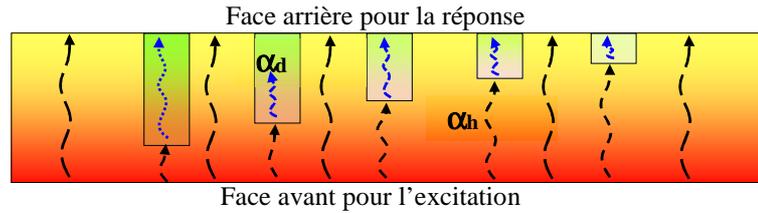


Figure 5 : Schéma typique de transmission de la température à différentes profondeurs dans l'échantillon

#### 4.2. Acquisitions des mesures expérimentales

Cette section traite les expériences utilisant le dispositif expérimental de la méthode flash en mode transmission décrit dans la section 2. Les thermocouples du capteur de contact sont mis en contact directe avec la face arrière de l'échantillon afin de couvrir toutes les zones de défauts ( $D_1$  à  $D_5$ ) ainsi que la zone homogène. Les résultats illustrés sur la figure (5-a) et (5-b), traduisent respectivement les thermogrammes expérimentaux mesurés simultanément en face arrière en utilisant les deux échantillons avec des défauts de l'étain et de la laine de verre. Dans le cas de l'étain (figure 5-a), le thermogramme de la zone homogène est situé au-dessous de tous les thermogrammes des zones de défauts. Plus le défaut est profond, plus son écart de la température par rapport à la zone homogène est important. A cet effet, on en déduit que la zone homogène constituée la partie froide de l'échantillon, par contre, les défauts sont les zones chaudes. Dans le cas de la laine de verre (figure 5-b), le thermogramme de la zone homogène est situé au-dessus de tous les thermogrammes des zones de défauts. Plus la température est inférieure, plus la profondeur du défaut est grande. On en déduit dans ce cas que la zone homogène est la partie la plus chaude de l'échantillon, tandis que les défauts constitués les zones froides. Dans la suite, on va comparer les diffusivité thermiques locales estimées en toutes zones de défauts détectés à celle de la zone homogène.

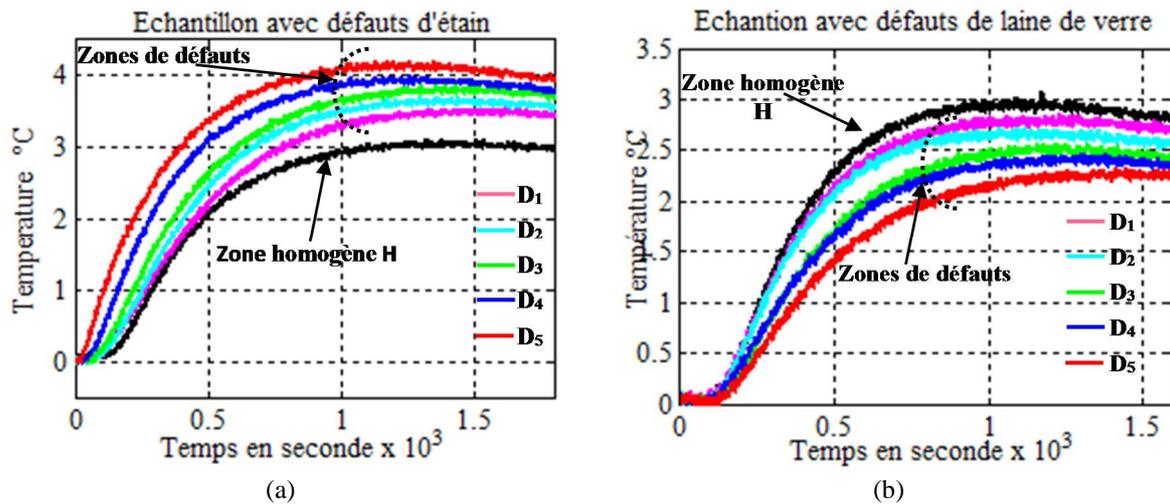


Figure 5 : Thermogrammes expérimentaux mesurés en différentes zones de la face arrière : (a) l'étain, (b) la laine de verre

#### 4.3. Détection des défauts par comparaison des diffusivités thermiques locales

Sur la figure (6-a) et (6-b), nous avons représenté les thermogrammes expérimentaux et les thermogrammes théoriques simulés par le modèle complet décrit ci-dessus. Les identifications des diffusivités thermiques locales sont illustrées dans les tableaux 1 et 2. Pour les deux échantillons, puisqu'elle s'agit de la même zone homogène, les valeurs de la diffusivité thermique estimées par le modèle de Parker (relation 6) et le modèle complet (relation 3), sont assez comparables ( $1.268 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \leq \alpha_H \leq 1.283 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ). Pour l'échantillon avec défauts d'étain (défauts conducteurs), les valeurs estimées de la diffusivité sont supérieures à celle de la zone homogène. Plus l'épaisseur du défaut augmente, plus la diffusivité est importante ( $1.392 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \leq \alpha_D \leq 2.651 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ). Dans le cas de l'échantillon avec défauts de laine de verre (défauts isolants), les valeurs estimées de la diffusivité sont inférieures à celle de la zone homogène. De plus, la diffusivité diminue avec l'épaisseur des défauts ( $1.034 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \leq \alpha_D \leq 1.214 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ). Ces résultats montrent que la détermination du champ de la diffusivité thermique en face arrière permet de fournir des informations importantes sur la nature thermophysiques des défauts détectés.

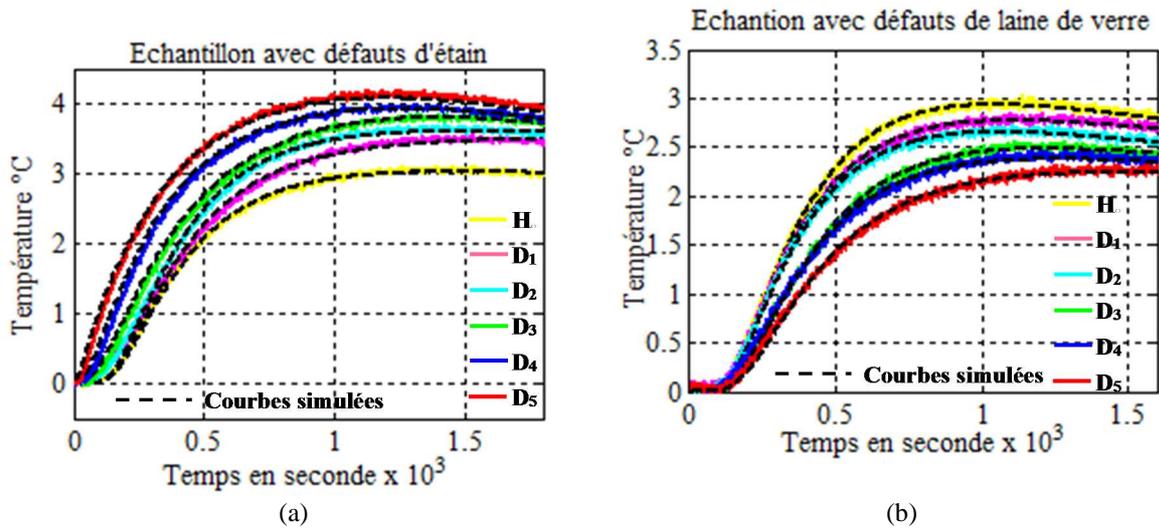


Figure 6 : Thermogrammes simulés (traits pointillés) par la méthode des quadripôles thermiques :  
 (a) l'étain, (b) la laine de verre

#### 4.4. Analyse du contraste thermique

Dans le cas d'un matériau présentant un défaut interne ou surfacique, l'excitation flash externe peut provoquer un contraste de température trahissant l'existence de ce défaut. Ce contraste thermique défini comme étant la différence de température entre celle de la zone de défaut  $T_D$  et celle de la zone homogène  $T_H$  ( $\Delta T = T_D - T_H$ ). Deux cas peuvent être présentés en fonction du signe de  $\Delta T$ . Dans le cas de  $\Delta T$  positif, la zone de défaut correspondante est plus chaude et plus conducteur que la zone homogène. Par contre, si  $\Delta T$  est négatif, le défaut est plus froid et plus isolant. Les figures (7-a) et (7-b) illustrent l'évolution temporelle des contrastes thermiques respectivement dans le cas des défauts ( $D_1$  à  $D_5$ ) d'étain et de laine de verre. Puisque les défauts d'étain sont conducteurs, leurs contrastes sont positifs. Par contre ils sont négatifs pour la laine de verre isolante. On constate dans les deux cas, l'existence d'un temps  $t_{max}$ , appelé temps de contraste maximum, correspondant à l'écart maximal relevé sur la courbe du contraste. A cet instant  $t_{max}$ , nous avons un maximum d'information transmise à la face arrière de l'échantillon. Notons aussi que  $t_{max}$ , dépend de la profondeur du défaut, de ses dimensions, des propriétés du matériau, ainsi que du temps de chauffe. Les tableaux 1 et 2 présentent les estimations des valeurs maximales des contrastes  $\Delta T_{max}$  ainsi les temps  $t_{max}$  correspondants. Dans tous les cas traités, plus le défaut est profond, plus le contraste thermique est important. Pour l'échantillon avec défauts conducteurs d'étain, les temps  $t_{max}$  sont tous inférieurs au temps de la demi-montée  $t_{1/2}$  ( $= 436$  s) utilisé par le modèle de Parker pour calculer la diffusivité thermique dans la zone homogène. Par contre pour l'échantillon avec défauts isolants de laine de verre, les  $t_{max}$  sont tous supérieurs au temps  $t_{1/2}$  ( $= 432$  s).

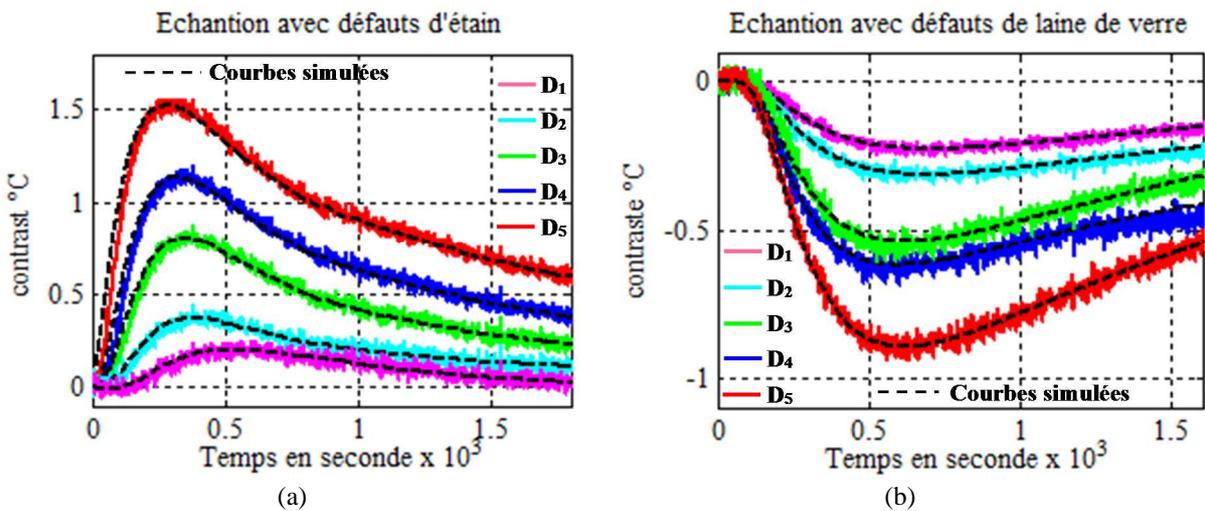


Figure 7 : Contrastes thermiques mesurés (traits pleins) et simulés (traits pointillés) :  
 (a) l'étain, (b) la laine de verre

Tableau 1 : Résultats expérimentaux obtenus sur un échantillon avec des défauts artificiels d'étain

Echantillon avec défauts d'étain Sn 50 : $\rho = 7310 \text{ kg.m}^{-3}$ , $\lambda = 66.6 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}$ , $c = 222 \text{ J.Kg}^{-1}.\text{K}$ ; $\alpha = 4.10^{-5} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$						
	Zone homogène	Zones des défauts				
	H	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>5</sub>
Epaisseur des défauts (mm)	0	3.5	5.7	8.6	11.7	14.5
Contraste maximal $\Delta T_{\text{max}}$ (°C)	---	0.27	0.46	0.88	1.21	1.56
Temps $t_{\text{max}}$ correspond à $\Delta T_{\text{max}}$ (s)	---	414	369	344	310	282
Diffusivité thermique ( $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ ) x $10^{-7}$						
Temps de la demi-montée $t_{1/2}$ (s)	436	399	350	334	293	247
Parker	1.274	1.392	1.587	1.66	1.892	2.246
Modèle complet	1.283	1.417	1.602	1.715	2.106	2.651

Tableau 2 : Résultats expérimentaux obtenus sur un échantillon avec des défauts artificiels de laine de verre

Echantillon avec défauts de laine de verre : $\rho = 35 \text{ kg.m}^{-3}$ , $\lambda = 0.039 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}$ , $c = 1030 \text{ J.Kg}^{-1}.\text{K}$ ; $\alpha = 1.08.10^{-7} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$						
	Zone homogène	Zones des défauts				
	H	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>5</sub>
Epaisseur des défauts (mm)	0	3.6	6.2	8.9	11.3	13.9
Contraste maximal $\Delta T_{\text{max}}$ (°C)	---	-0.23	-0.34	-0.57	-0.65	-0.94
Temps $t_{\text{max}}$ correspond à $\Delta T_{\text{max}}$ (s)	---	543	557	576	598	627
Diffusivité thermique ( $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ ) x $10^{-7}$						
Temps de la demi-montée $t_{1/2}$ (s)	432	457	469	491	512	537
Parker	1.268	1.214	1.185	1.131	1.085	1.034
Modèle complet	1.279	1.237	1.192	1.154	1.109	1.067

## Conclusion

Dans cette communication, nous avons présenté une contribution à la détection et la caractérisation des défauts dans des matériaux homogènes. Deux types de défauts conducteurs et isolants sont testés afin d'estimer les diffusivités thermiques locales et les contrastes thermiques qui sont essentiels pour la détection des défauts dans les matériaux. L'élément fondamental du dispositif expérimental conçu est un capteur surfacique à faible coût réalisé à partir des thermocouples de type K. Le principe de test utilisé, s'inspire de la méthode flash en mode transmission en comparant les contrastes thermiques générés en face arrière afin d'établir un système de détection des défauts. Les résultats expérimentaux obtenus sont encourageants et laissent le champ des perspectives ouvert vers une caractérisation en profondeur des défauts détectés dans les matériaux.

## Nomenclature

$\alpha_{ij}$	diffusivité thermique locale, $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$	$\Delta T_{\text{max}}$	Contraste thermique maximal, °C
T	température, °C	$t_{\text{max}}$	Temps du contraste maximal, s
h	coefficient d'échange, $\text{W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$	$t_{1/2}$	Temps de demi-montée, s
t	temps, s	<i>Symboles grecs</i>	
$t_0$	durée du Flash, s	$\lambda_{ij}$	conductivité thermique locale, $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
S	surface, $\text{m}^2$	$\theta$	transformée de Laplace de T
p	variable de Laplace, $\text{s}^{-1}$	$\varphi_0$	flux de chaleur du Dirac
e	épaisseur, m	$\rho$	masse volumique, $\text{Kg.m}^{-3}$
$\Delta T$	Contraste thermique, °C	<i>Indices et exposants</i>	
$T_D$	Température de la zone de défaut, °C	i, j	Position du thermocouple
$T_H$	Température de la zone homogène, °C	x, y, z	Direction spatiale

## Références

- [1] V. P. Vavilov, D. D. Burleigh 'Review of pulsed thermal NDT: Physical principles, theory and data processing' NDT&E International 73 (2015) 28–52, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2015.03.003>
- [2] D. P. Almond and S. G. Pickering 'An analytical study of the pulsed thermography defect detection limit' Journal of Applied Physics 111, 093510 (2012), <http://dx.doi.org/10.1063/1.4704684>
- [3] V. Feuillet, L.Ibos, M.Fois, J.Dumoulin, Y.Candau 'Defect detection and characterization in composite materials using square pulse thermography coupled with singular value decomposition analysis and thermal quadrupole modeling' NDT&E International 51 (2012) 58–67, [doi.org/10.1016/j.ndteint.2012.06.003](http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2012.06.003)
- [4] C. Ibarra-Castanedo, D. González, M. Klein, M. Pilla, S. Vallerand, X. Maldague 'Infrared image processing and data analysis' Infrared Physics & Technology, N° 46, 75–83, December 2004, <http://dx.doi.org/10.1016/j.infrared.2004.03.011>
- [5] X. Maldague and S. Marinetti 'Pulse phase infrared thermography' Journal of Applied Physics 79, 2694 (1996), <http://dx.doi.org/10.1063/1.362662>
- [6] Maldague X. 'Nondestructive evaluation of materials by infrared thermography', Springer-Verlag, London, (1993), [doi 10.1007/978-1-4471-1995-1](http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4471-1995-1)
- [7] M.S. Benmoussat, M. Guillaume, Y. Caulier, K. Spinnler 'Automatic metal parts inspection: Use of thermographic images and anomaly detection algorithms' Infrared Physics & Technology 61 (2013) 68–80, <http://dx.doi.org/10.1016/j.infrared.2013.07.007>
- [8] C. Meola, S. Boccardi and G. M. Carlomagno 'Infrared Thermography in the Evaluation of Aerospace Composite Materials - Infrared Thermography to Composites' Woodhead Publishing, Elsevier (2017), <http://dx.doi.org/10.1016/B978-1-78242-171-9.01001-9>
- [9] A.Vageswar, K. Balasubramaniam, C.V. Krishnamurthy, T. Jayakumar, B. Raj 'Periscope infrared thermography for local wall thinning in tubes' NDT&E International 42 (2009) 275–282, [doi:10.1016/j.ndteint.2008.11.008](http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2008.11.008)
- [10] Parker W.J., Jenkins R.J., Butler C.P. and Abbott G.L., "Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity, and Thermal Conductivity", J. Appl. Phys., 32, 9, 1961, 1679-1684, [doi: 10.1063/1.1728417](http://dx.doi.org/10.1063/1.1728417)
- [11] Degiovanni A. « Diffusivité et méthode Flash » Revue générale de thermique, N°185, 420–442, Mai 1977.
- [12] A. Kabouri, A.Khabbazi, H. Youlal, and M. Janati-Idrissi 'Local detection of defects in materials by thermal analysis – flash method' Eur. Phys. J. Appl. Phys., May 2016. [doi: 10.1051/epjap/2016150409](http://dx.doi.org/10.1051/epjap/2016150409)
- [13] A. Kabouri, A. Khabbazi, H. Youlal 'Estimation surfacique 2D de défauts dans les matériaux homogènes par analyse thermique locale avec contact' JITH -2015, Marseille, France, 2015
- [14] D. Maillet, S. André, J. C. Batsale, A. Degiovanni, C. Moyne 'Thermal Quadrupoles : Solving the Heat Equation through Integral Transforms' John Wiley and sons (2000)
- [15] Marquart D. An algorithm for least squares estimation of non-linear parameters. Soc Ind Appl Math 1963; 11:431–41.
- [16] Stehfest H., Algorithm 368 : Numerical inversion of Laplace transforms [D5], Communication ACM, 13 [1], 47–49 (1970).