

Contrôle Non Destructif quantitatif 1D de matériaux opaques par thermographie infrarouge biface et méthodes de températures duales.

Maud PIQUERAS^{1*}, Jean-François Henry¹, Rodolphe VAILLON², Hervé PRON¹, Christophe RODIET^{1*}

¹TheMM, EA 7548, Université de Reims Champagne-Ardenne, Campus Moulin de la Housse 51687 Reims, France

²IES, Univ Montpellier, CNRS, Montpellier, France

*Contact : maud.piqueras@etudiant.univ-reims.fr ; christophe.rodiet@univ-reims.fr

Résumé - Ce travail s'intéresse à la détection quantitative de défauts (définition de la position et des propriétés thermiques) à travers une méthode de caractérisation basée sur la mesure simultanée de l'évolution de températures en faces avant et arrière d'un échantillon. De cette façon, les difficultés liées à la détectivité et à la localisation du défaut, rencontrées en utilisant des méthodes classiques mono face (contraste avant/arrière), peuvent être palliées.

Nomenclature

a	diffusivité thermique ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	ρ	masse volumique ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
c_p	capacité calorifique massique ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	σ	écart-type
e	épaisseur (m)	ϕ	transformée de Laplace du flux de chaleur
h	coefficient de transfert de chaleur par convection ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)	φ_{flash}	densité surfacique de la source thermique ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)
L	transformée de Laplace	φ_{max}	coefficient d'intensité maximale de la source thermique ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)
m	pourcentage de l'amplitude maximal du signal mesuré en face arrière (%)	τ	temps d'impulsion de l'excitation thermique (s)
p	variable de Laplace		<i>Indices et exposants</i>
R_d	résistance thermique du défaut ($\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$)	0	zone saine
T	température ($^{\circ}\text{C}$)	1	face avant
t	temps (s)	2	face arrière
t_{cd}	temps de conduction thermique (s)	d	zone avec défaut
t_{rd}	temps de conduction à travers un défaut (s)	$dual$	méthode biface de températures duales
X	matrice de sensibilité	$estim$	valeur estimée
x_d	position du défaut (m)	exp	valeur expérimentale
	<i>Symboles</i>	i	i-ème colonne
Δ	contraste	j	j-ème élément
ϵ	erreur relative (%)	$norm$	valeur normée
θ	transformée de Laplace de la température	$temp$	méthode biface température-température
λ	conductivité thermique ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	th	valeur théorique

1. Introduction

Le contrôle non destructif (CND) présente un intérêt majeur pour préserver la pérennité des systèmes développés pour la transition énergétique. Par exemple, dans le domaine de la production et du transport d'énergie ou dans le bâtiment, les structures impliquées sont soumises à des contraintes externes pouvant endommager les propriétés constitutives des matériaux utilisés et ainsi altérer considérablement les performances et la durée de vie de ceux-ci (ex : diagnostic ou maintenance de pales d'éolienne, de structures ou de bâtiments, usure de pipeline...). Parmi les méthodes d'inspection standard, la thermographie infrarouge (TIR) active

est très utile pour détecter et caractériser les défauts de façon rapide, sans contact et non destructive pour le matériau.

Différentes approches peuvent être mises en œuvre suivant la nature de l'excitation thermique considérée [1]. Cette étude s'intéresse en particulier aux configurations se servant d'une source d'énergie optique. La thermographie pulsée (PT) et modulée (LT) font partie des principales classes de techniques de TIR. Elles regroupent un ensemble de méthodes qualitatives, pour procéder uniquement à la détection du défaut, et quantitatives, qui permettent une caractérisation approfondie de ces propriétés (taille, forme, profondeur, diffusivité, résistance thermique...) [2]. Dans les deux cas, les procédures de CND doivent faire face à de nombreuses difficultés. En effet, le grand nombre de paramètres à estimer, de données expérimentales et numériques à traiter, et également le caractère mal posé du problème inverse associé aux corrélations et aux faibles sensibilités aux paramètres, ainsi qu'à un faible rapport signal/bruit, peuvent conduire à un mauvais conditionnement numérique lors de l'inversion [3]. Des méthodes quantitatives de traitement avancé du signal sont développées pour faire face à ces différents aspects et les plus courantes sont la « Thermal Signal Reconstruction » (TSR), la « Pulsed Phase Transformation » (PPT) ou encore la « Principal Component Thermography » (PCT) [4]. Cependant, les performances de ces dernières sont souvent dépendantes du matériau utilisé ainsi que de la position et des propriétés thermiques du défaut. De cette façon, il est délicat de désigner une approche globalement plus performante que les autres.

C'est donc dans ce contexte qu'une méthode de CND quantitatif est proposée, dont les objectifs sont de permettre de caractériser les propriétés thermiques des zones saines et des défauts, en étant à la fois simple à mettre en œuvre, précise et robuste. Le concept expérimental est basé sur une excitation optique impulsionnelle et sur la mesure par thermographie infrarouge simultanée des températures en faces avant et arrière des échantillons. La présente étude se focalise sur la caractérisation thermique unidirectionnelle de matériaux sains, ainsi que de défauts modélisables par des résistances thermiques. De cette façon, plusieurs modèles sont établis à l'aide de la méthode des quadripôles [5]. Basée sur une technique de caractérisation "température-température" de matériaux sains, une des méthodes développées consiste à utiliser la réponse en face avant convoluée avec une fonction de transfert dans le but d'estimer les propriétés du défaut tout en réduisant le nombre de paramètres du modèle [6]. D'autre part, l'estimation de paramètres est également faite à partir d'une fonctionnelle duale composée de deux mesures différentes de température, permettant ainsi de combiner les informations issues des deux thermogrammes dans le but de palier les problèmes de détectabilité et de localisation de défauts. Enfin, les performances statistiques des méthodes sont présentées et analysées, en utilisant des données bruitées à l'aide d'une méthode de Monte Carlo. Ces résultats sont comparés par rapport à ceux obtenus par des techniques classiques basées sur l'estimation des paramètres du défaut à partir de la courbe de contraste réalisée en face avant ou arrière [7].

2. Concept expérimental

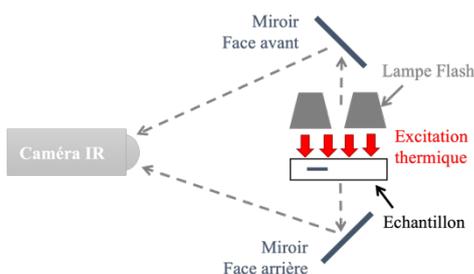


Figure 1. Schéma du concept expérimental

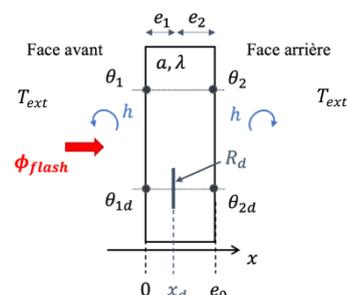


Figure 2. Schéma du modèle de transfert thermique

Le schéma du principe expérimental est présenté sur la Figure 1. Une caméra infrarouge est utilisée pour acquérir les images de l'évolution spatio-temporelle de la température d'un échantillon. Dans le but de réaliser une mesure simultanée de la température en face avant et arrière de l'échantillon avec la même caméra, un dispositif de miroirs infrarouges est utilisé. La face avant de l'échantillon est chauffée par un flux radiatif (excitation optique avec des lampes Flash) dont la forme spatiotemporelle peut être mesurée par une photodiode.

3. Modélisation du transfert thermique

3.1. Problème général

On considère un échantillon opaque, homogène et faiblement réfléchissant d'épaisseur e_0 (Figure 2). Le matériau est soumis à des pertes radiatives et conducto-convectives en faces avant et arrière, de coefficient d'échange thermique global h . Il faut distinguer ici deux zones de mesure différentes, l'une étant saine et l'autre centrée autour du défaut. Soient $\theta_i(p) = L\{T_i(t) - T_{ext}\}$ dans la zone saine et $\theta_{id}(p) = L\{T_{id}(t) - T_{ext}\}$ dans la zone avec défaut ($i = 1, 2$), l'échauffement entre la température T_i et T_{id} d'une face et la température extérieure T_{ext} (supposée constante). Les deux points de mesures sont suffisamment éloignés l'un de l'autre et loin des surfaces latérales de l'échantillon de façon à pouvoir négliger les effets de bord (modification des lignes de champ). Dans cette étude, on suppose que le comportement thermique du défaut peut être modélisé par une résistance thermique R_d localisée à une profondeur x_d . Dans le cas d'une excitation thermique $\phi_{flash}(t)$ (dont la transformée de Laplace est notée $\phi_{flash}(p)$ avec p la variable de Laplace) uniforme sur la face avant, le transfert de chaleur peut être considéré comme étant 1D suivant l'axe x . Le signal d'excitation est assimilé à un signal triangulaire d'intensité maximale ϕ_{max} et de durée τ .

3.2. Modélisation quadripolaire

La méthode des quadripôles est utilisée pour résoudre le problème de transfert thermique correspondant à la Figure 2 [5]. L'équation de diffusion de la chaleur est transformée dans le domaine de Laplace de façon à obtenir les relations suivantes dans la zone saine (éq. (1)) et avec défaut (éq. (2)) :

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \phi_{flash} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ h & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_0 & B_0 \\ C_0 & D_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ h & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_2 \\ \phi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_2 \\ \phi_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \theta_{1d} \\ \phi_{flash} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ h & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & R_d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ h & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{2d} \\ \phi_{2d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_d & B_d \\ C_d & D_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{2d} \\ \phi_{2d} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Les coefficients de transferts de la matrice quadripolaire A_i , B_i , C_i et D_i et ($i = 0,1,2$) sont définis pour les différentes couches d'échantillon i et d'épaisseur e_i . Dans la zone avec défaut les épaisseurs sont exprimées telles que $e_1 = x_d$ et $e_2 = e_0 - x_d$. Soit avec $\gamma = \sqrt{p/a}$:

$$A_i = D_i = \cosh(\gamma e_i); B_i = \frac{1}{\lambda \gamma} \sinh(\gamma e_i); C_i = \lambda \gamma \sinh(\gamma e_i) \quad (3)$$

Les équations (1) et (2) sont résolues analytiquement (avec $\phi_2 = \phi_{2d} = 0$) de manière à obtenir dans le domaine de Laplace l'évolution de la température en face avant et arrière dans une configuration sans défaut :

$$\theta_1 = \phi_{flash} A/C; \quad \theta_2 = \phi_{flash} 1/C \quad (4)$$

Et avec défaut :

$$\theta_{1d} = \phi_{flash} A_d/C_d; \quad \theta_{2d} = \phi_{flash} 1/C_d \quad (5)$$

A partir de (4) et (5) il est possible d'établir plusieurs relations entre θ_2 , θ_{2d} et θ_1 , θ_{1d} . La température en face arrière $\theta_{2,temp}$ en zone saine peut s'exprimer comme étant le produit de la température en face avant et d'une fonction de transfert telle que

$$\theta_{2,temp} = \theta_1/A \quad (6)$$

Dans cette méthode de caractérisation "température-température" les propriétés liées au flux n'apparaissent pas dans le modèle ce qui permet de réduire le nombre de paramètre à estimer [6]. De la même façon, en ayant $\phi_1 = \phi_{1d} = \phi_{flash}$ dans les équations (1) et (2), la température en face arrière en zone saine $\theta_{2,1d}$ peut s'exprimer en fonction de la réponse en face avant dans une zone défectueuse et inversement, la température en face arrière dans une zone avec défaut $\theta_{2d,1}$ peut s'exprimer en fonction de la réponse en face avant dans une zone saine :

$$\theta_{2,1d} = \frac{c_d}{A_d \cdot c} \theta_{1d}; \quad \theta_{2d,1} = \frac{c}{A \cdot c_d} \theta_1 \quad (7)$$

Des modèles de températures duales θ_{dual} , $\theta_{dual,d}$ et $\theta_{dual,temp}$ sont construits respectivement à partir de (4), (5) et (7) dans la zone saine et celle avec défaut :

$$\theta_{dual} = [\theta_1; \theta_2]; \quad \theta_{dual,d} = [\theta_{1d}; \theta_{2d}]; \quad \theta_{dual,temp} = [\theta_{2,1d}; \theta_{2d,1}] \quad (8)$$

On exprime également le contraste $\Delta\theta_i$ pouvant être défini en face avant et arrière par la différence des réponses en température de la zone avec défaut et de la zone saine :

$$\Delta\theta_i = \theta_{id} - \theta_i, \forall i \in [1; 2] \quad (9)$$

On distingue ici deux différents types de méthodes : mono face, basée sur une mesure de température en face avant ou arrière (éq. 4, 5 et 9) et biface, qui utilise les mesures des deux faces de l'échantillon (éq. 6 et 8). Une transformée de Laplace inverse est réalisée numériquement grâce à l'algorithme de De Hoog [8], pour obtenir les modèles issus de (4-9) dans le domaine temporel (notées respectivement T_1 , T_2 , T_{1d} , T_{2d} , $T_{2,temp}$, T_{dual} , $T_{dual,d}$, $T_{dual,temp}$, ΔT_1 , ΔT_2). Les thermogrammes utilisés pour la détection de défauts à partir des courbes de contraste sont représentés sur les Figures 3 et 4. La Figure 3 illustre les réponses en température avant et arrière en zone saine et avec défaut, tandis que la Figure 4 représente le contraste observé en face avant et arrière dans le cas d'un échantillon d'épaisseur $e_0 = 2 \text{ mm}$ et $\lambda = 150 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour un défaut proche de la face arrière ($x_d = 5/6 * e_0$) de résistance thermique $R_d = 10^{-3} \text{ m}^2.\text{K.W}^{-1}$. Le signal de contraste observé en face avant a une amplitude plus faible comparé à ΔT_2 , ce qui peut rendre compliqué la détection d'un défaut en particulier sur des thermogrammes bruités (faible rapport signal sur bruit).

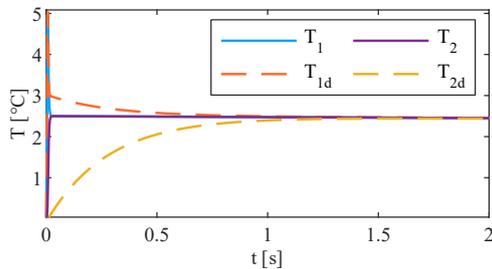


Figure 3. Températures en faces avant et arrière dans les zones avec et sans défaut (éq. 4-5)

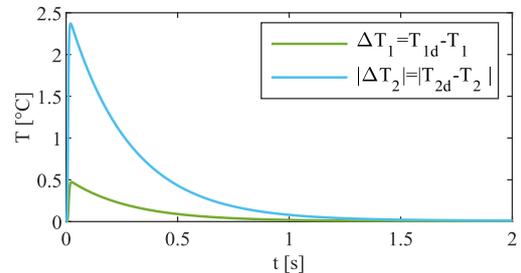


Figure 4. Courbes de contraste (éq. 9) issues des signaux de la Figure 3

On définit la matrice de sensibilité \mathbf{X} composée des coefficients $X_{ij} = \left. \frac{\partial T(t_i, \beta)}{\partial \beta_j} \right|_{t_i, \beta_k, (k \neq j)}$. Les sensibilités absolues et normées $\mathbf{X}_{\beta_j}^{norm} = \mathbf{X}_{\beta_j} / \max(\mathbf{X}_{\beta_j})$ aux paramètres R_d et x_d sont tracées sur les Figures 5 à 8 en vue d'étudier leur comportement dans un cas limite où un défaut de

résistance thermique $R_d = 10^{-3} m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$ est positionné proche de la face arrière d'un échantillon d'épaisseur $e_0 = 2$ mm et de conductivité thermique $\lambda = 150 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$. Dans le cas de la méthode mono face arrière et biface "température-température" duale, respectivement représentées sur les Figures 6 et 7, certains paramètres sont fortement corrélés, ce qui pourra influencer la justesse de l'estimation des propriétés du défaut ainsi que les variances associées. Une tendance similaire peut également être observée sur la Figure 5 avec la méthode mono face avant qui peut rencontrer des difficultés pour détecter le défaut lorsque celui-ci est suffisamment profond et possède une résistance thermique faible. (cf. section 5.2). Les modèles de températures duales dans les Figures 7 et 8 montrent plusieurs maximums de sensibilité des paramètres à différents instants t . Les tendances de corrélations sont ainsi atténuées en combinant l'information de deux différents points de mesure dans une même fonctionnelle.

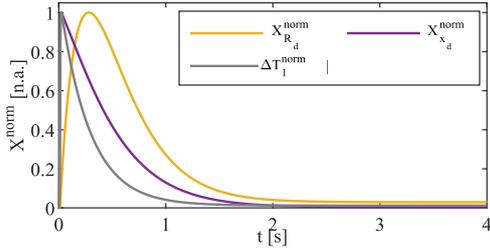


Figure 5. Sensibilités normées méthode mono face avant ΔT_1 (éq. 9)

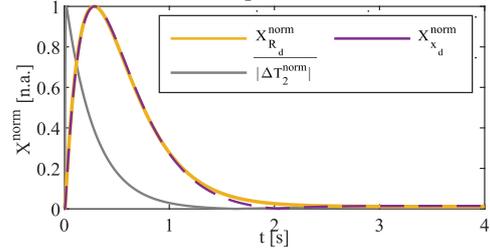


Figure 6. Sensibilités normées méthode mono face arrière ΔT_2 (éq. 9)

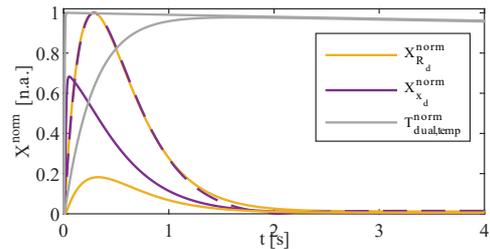


Figure 7. Sensibilités normées méthode biface température-température duale $T_{dual,temp}$ (éq. 8)

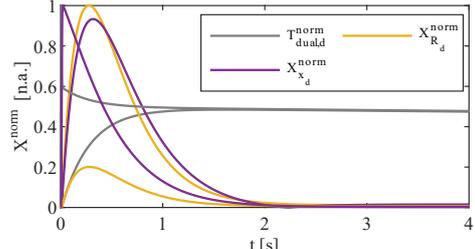


Figure 8. Sensibilités normées méthode biface de températures duales $T_{dual,d}$ (éq. 8)

4. Méthode d'estimation

Le problème inverse est basé sur une méthode de moindres carrés qui consiste à trouver la solution optimale permettant de minimiser la fonctionnelle :

$$S(\boldsymbol{\beta}) = \sum_{i=1}^M (T_i^{exp} - T_i^{th}(\boldsymbol{\beta}))^2 ; T_i^{exp} \equiv T^{exp}(t_i) \quad (10)$$

où T_i^{exp} désigne les températures mesurées aux temps t_i , T_i^{th} les températures calculées aux temps t_i à l'aide des modèles de transfert de chaleur présentés dans la Section 3.2 avec $\boldsymbol{\beta}$ le vecteur de j paramètres à estimer et M le nombre de points de mesures. On définit $\boldsymbol{\beta}$

- dans la zone saine

$$\left| \begin{array}{l} \boldsymbol{\beta} = \left[\frac{\varphi_{max}}{\rho c_p e_0} ; a ; h \right] \text{ pour } T_1, T_2, T_{dual} \\ \boldsymbol{\beta} = [a ; h] \text{ pour le modèle } T_{2,temp} \end{array} \right.$$

- dans la zone avec défaut

$$\left| \begin{array}{l} \boldsymbol{\beta} = \left[\frac{\varphi_{max}}{\rho c_p e_0} ; h ; R_d ; x_d \right] \text{ pour } T_{1d}, T_{2d}, T_{dual,d}, \Delta T_1 \text{ et } \Delta T_2 \\ \boldsymbol{\beta} = [h ; R_d ; x_d] \text{ pour le modèle } T_{dual,temp} \end{array} \right.$$

Dans la procédure d'estimation, la diffusivité thermique est estimée à partir des modèles de la zone saine et est supposée connue pour l'estimation des propriétés du défaut. Dans cette étude la valeur de ρc_p peut être fixée en considérant que la capacité thermique est estimée grâce à une méthode de calorimétrie dans une expérience indépendante ($\rho c_p = 10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$).

La fonction coût S est minimisée à l'aide d'un algorithme de type Levenberg-Marquardt régularisé [9]. L'estimation est faite à partir de $M = 1000$ mesures sur une durée $t_{max} = t_{tcd} + t_{rd}$ avec $t_{cd} = e_0^2/a$ le temps de diffusion de la chaleur et $t_{rd} = \rho c_p e_0 R_d$. Les données expérimentales synthétiques utilisées pour l'estimation sont issues des résultats des modèles présentés dans la section 3.2 auxquels est ajouté un bruit numérique gaussien de moyenne nulle et d'écart type σ_B calculé à m % de l'amplitude maximale du signal mesuré en face arrière. Les propriétés statistiques (moyenne et d'écart-types σ_{MC}) sont étudiées par une méthode de Monte Carlo pour un nombre de mesures $N = 100$.

5. Résultats

Cette partie confronte des méthodes mono et bifaces utilisées pour la caractérisation thermique de la zone saine (section 5.1) et la détection quantitative de défaut (section 5.2). L'estimation de paramètre (en particulier a , x_d et R_d) est réalisée dans plusieurs configurations répertoriées dans le Tableau 1 en fixant la conductivité thermique de l'échantillon à $\lambda = 150 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, pour tester la robustesse des méthodes.

Paramètre	Symbole	Unité	Valeur
Bruit	m	%	[0 ; 1 ; 2 ; 5]
Épaisseur d'échantillon	e_0	m	[0.001 ; 0.002 ; 0.01]
Résistance thermique du défaut	R_d	$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$	[10^{-2} ; 10^{-3} ; 10^{-4} ; 10^{-5} ; 10^{-6}]
Profondeur du défaut	x_d	m	[1/6 ; 1/3 ; 1/2 ; 2/3 ; 5/6] * e_0

Tableau 1. Valeurs des paramètres de simulation

5.1 Estimation de la diffusivité thermique de la zone saine

Dans le but d'estimer les propriétés thermiques de la zone saine on met en œuvre deux méthodes mono-face, issues des modèles T_1 , T_2 (cf. éq. (4)) et bifaces, en utilisant les modèles $T_{2,temp}$, T_{dual} (respectivement cf. éq. (6) et (8)). Les erreurs relatives calculées par rapport à l'estimation de la diffusivité thermique avec les différents modèles sont présentées dans le Tableau 2. Dans chaque configuration les résultats les plus probant sont surligné en gras.

$a = 1.5 * 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$									
Modèles		T_1		T_2		$T_{2,temp}$		T_{dual}	
e_0 [mm]	m [%]	ϵ_{rel} [%]	σ_{MC} [%]	ϵ_{rel} [%]	σ_{MC} [%]	ϵ_{rel} [%]	σ_{MC} [%]	ϵ_{rel} [%]	σ_{MC} [%]
1	0	0.05	0.00	3.10^{-5}	0.00	9.10^{-5}	0.00	0.02	0.00
	1	0.06	0.05	0.01	0.09	1.10^{-4}	0.02	0.03	0.01
	2	0.06	0.05	1.10^{-3}	0.14	3.10^{-3}	0.04	0.03	0.02
	5	0.05	0.10	2.10^{-4}	0.41	0.01	0.08	0.02	0.05
2	0	0.03	0.00	4.10^{-5}	0.00	4.10^{-4}	0.00	0.03	0.00
	1	0.04	0.03	2.10^{-4}	0.02	4.10^{-4}	0.01	0.03	0.01
	2	0.04	0.03	1.10^{-3}	0.05	2.10^{-3}	0.02	0.03	0.02
	5	0.04	0.07	5.10^{-3}	0.13	3.10^{-3}	0.05	0.03	0.04
10	0	0.02	0.00	4.10^{-7}	0.00	2.10^{-3}	0.00	9.10^{-4}	0.00
	1	0.18	0.10	2.10^{-4}	0.02	1.10^{-3}	0.01	0.03	0.03
	2	0.24	0.14	2.10^{-3}	0.04	1.10^{-3}	0.02	0.06	0.05
	5	0.39	0.26	7.10^{-3}	0.10	6.10^{-3}	0.05	0.09	0.08

Tableau 2. Résultats d'estimation de la diffusivité thermique avec les modèles T_1 , T_2 , $T_{2,temp}$ et T_{dual} pour différentes épaisseurs d'échantillon et niveau de bruit de mesure

Le modèle mono face avant aboutit aux résultats les moins précis. En combinant les signaux en face avant et arrière, l'écart type statistique de l'estimation est le plus faible pour les plus petites épaisseurs d'échantillon. Les erreurs d'estimations du modèle $T_{2,temp}$ sont globalement du même ordre de grandeur que celles du modèle mono face arrière T_2 et montre une dispersion plus faible des résultats d'estimation. En considérant les faibles valeurs d'incertitudes et d'écart type, les quatre méthodes étudiées permettent d'obtenir des résultats acceptables pour estimer la diffusivité thermique dans une zone saine. Pour plus de précision et de robustesse méthode $T_{2,temp}$ donne globalement les meilleurs résultats.

5.2 Estimation des propriétés du défaut

En tenant compte des résultats d'estimation du Tableau 2, les valeurs de diffusivités thermiques calculées dans les différentes configurations avec les modèles en zone saine sont supposées connues dans les modèles correspondants de zone avec défaut. Les méthodes mono face de contraste avant ΔT_1 et arrière ΔT_2 , se basent respectivement sur l'estimation de la diffusivité avec T_1 , T_2 . De même pour les méthodes bifaces $T_{dual,temp}$ et $T_{dual,d}$ qui utilisent les résultats issus de $T_{2,temp}$ et T_{dual} . Les erreurs d'estimations commises sur a sont volontairement prises en compte dans le but de tester les performances des méthodes de CND dans leur intégralité. De cette façon on s'intéresse plus particulièrement à l'estimation de la profondeur du défaut x_d et à sa résistance thermique R_d . Les résultats d'estimations obtenus avec des méthodes mono face sur des données bruitées à 1%, dans le cas d'un échantillon d'épaisseur $e_0 = 2 \text{ mm}$ sont présentées sur les Figures 11 et 12. La position du défaut estimée est tracée en fonction de la résistance thermique estimée par les modèles de contraste ΔT_1 et ΔT_2 . L'intersection des lignes grises symbolisent les valeurs cibles des paramètres. Les données représentées sans surlignage de couleur sont estimées avec une erreur relative inférieure à 1%.

Le faible rapport signal sur bruit ajouté aux tendances de corrélation entre les paramètres (cf. Figure 5) peuvent conduire à des erreurs d'estimations et des écarts types importants avec la méthode de contraste avant (cf. Figure 11), lorsque le défaut est positionné loin de la face où est effectuée la mesure, ou que sa résistance thermique est petite. Avec la méthode mono face arrière, dont les résultats sont représentés sur la Figure 12, il est difficile (voire impossible) de définir avec certitude la profondeur du défaut par rapport au centre de l'échantillon (problème de symétrie dans les équations) bien qu'il soit détectable dans la majorité des cas.

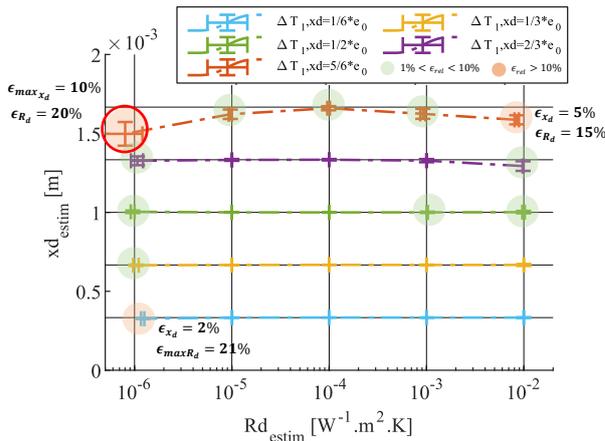


Figure 11. Résultats d'estimation des propriétés du défaut avec la méthode ΔT_1 ($m=1\%$) (ég. 9)

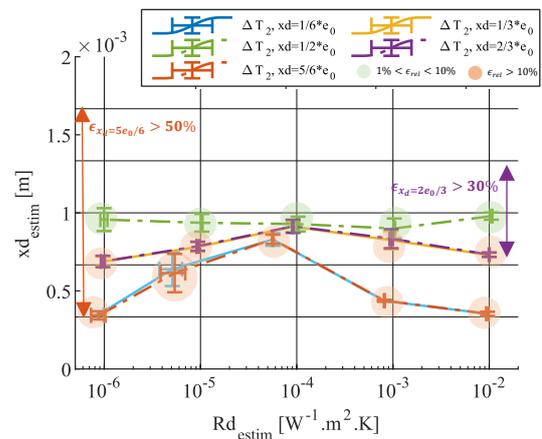


Figure 12. Résultats d'estimation des propriétés du défaut avec la méthode ΔT_2 ($m=1\%$) (ég. 9)

Les résultats d'estimations obtenus avec les méthodes bifaces sur des données bruitées à 1%, dans le cas d'un échantillon d'épaisseur $e_0 = 2 \text{ mm}$ sont présentées sur les Figures 13 et 14. La position du défaut estimée est tracée en fonction de la résistance thermique estimée par les

modèles "température-température" $T_{dual,temp}$ et températures duales $T_{dual,d}$. Les méthodes de températures duales semblent plus performantes que les méthodes classiques de contraste avant et arrière (écarts types et erreurs relative maximale plus faibles). Des erreurs plus faibles sont également obtenues lorsqu'on considère des conditions expérimentales défavorables (signal avec un bruit de grande amplitude : $m=5\%$ non représenté ici pour une questions de place) : les erreurs maximales commises sur x_d et R_d avec $T_{dual,d}$ sont respectivement de 4% et 13%, et de 3% et 7% avec $T_{dual,temp}$. Le modèle biface "température-température" duale permet d'estimer un nombre réduit de paramètres par rapport à $T_{dual,d}$ tout en combinant les informations issues de plusieurs thermogrammes (éq. 8), rendant ainsi la caractérisation quantitative des défauts plus précise dans des cas limites. Cependant, cette méthode est moins performante lorsqu'il s'agit de localiser un défaut thermiquement épais.

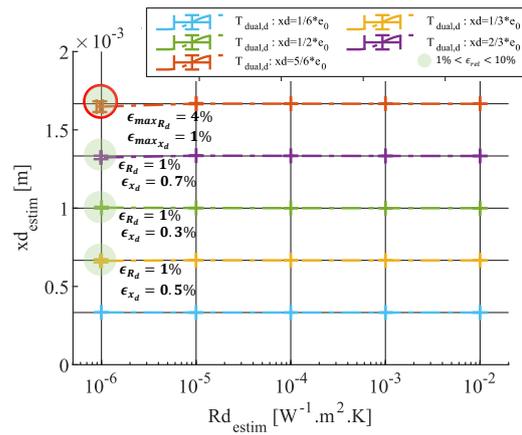
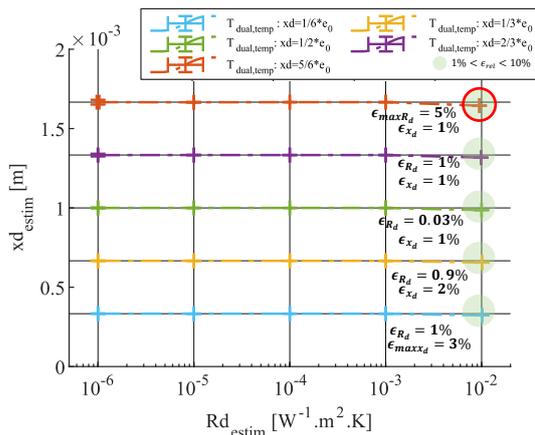


Figure 13. Résultats d'estimation des propriétés du défaut avec la méthode $T_{dual,temp}$ ($m=1\%$) (éq. 8)

Figure 14. Résultats d'estimation des propriétés du défaut avec la méthode $T_{dual,d}$ ($m=1\%$) (éq. 8)

6. Conclusion

Il a été montré que l'estimation de la diffusivité thermique dans la zone saine d'un échantillon peut être obtenue de façon précise à partir de méthodes bifaces et mono face avant et arrière. En utilisant une fonctionnelle de températures duales (cf. éq (8)), combinant deux thermogrammes mesurés simultanément en différents points d'un échantillon, pour caractériser les propriétés du défaut, de meilleures performances sont obtenues par rapport aux méthodes mono face de contraste. En associant au concept les avantages d'un modèle "température-température" (cf. $T_{dual,temp}$ éq. (8)), qui ne dépend pas des paramètres de l'excitation thermique, la méthode peut permettre d'améliorer la précision et la robustesse de l'estimation. Globalement la meilleure méthode pour caractériser à la fois les propriétés de la zone saine et du défaut dans les configurations étudiées semble être celle des modèles bifaces "température-température" (cf. éq. (6) et $T_{dual,temp}$ éq. (8)).

Références

- [1] C. Ibarra-Castaneda *et al.*, Active infrared thermography techniques for the nondestructive testing of materials. *Ultrason. Adv. Methods Nondestruct. Test. Mater.* (2007).
- [2] C. Ibarra-Castaneda *et al.*, Nondestructive testing with thermography. *Eur. J. Phys.* (2013).
- [3] D. Maillat *et al.*, Problèmes inverses en diffusion thermique - Formulation et résolution du problème des moindres carrés. 'Physique énergétique' (2018).
- [4] V. P. Vavilov *et al.*, Review of pulsed thermal NDT: Physical principles, theory and data processing. *NDT E Int.* (2015).
- [5] D. Maillat *et al.*, Thermal Quadrupoles: An Efficient Method for Solving the Heat Equation Through Integral Transform. *John Wiley Sons* (2000).
- [6] D. Maillat *et al.*, Analysis of the estimation error in a parsimonious temperature-temperature characterization technique. *Int. J. Heat Mass Transf.* (2013).
- [7] D. Maillat *et al.*, Non-destructive thermal evaluation of delaminations in a laminate: Part I—Identification by measurement of thermal contrast. *Compos. Sci. Technol.* (1993).
- [8] F. R. de Hoog *et al.*, An Improved Method for Numerical Inversion of Laplace Transforms. *SIAM* (1982).
- [9] P. E. Gill *et al.*, Algorithms for the Solution of the Nonlinear Least-Squares Problem. (1978).