

Approche expérimentale d'analyse thermique locale par contact pour le contrôle non destructif

A. Kabouri^{1*}, A. Khabbazi², H. Youlal³

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

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

³UFR/ATI Unité de Formation et de Recherche en Automatique et Traitement de l'Information, Faculté des Sciences de Rabat, BP 1014 – Rabat Maroc

* (auteur correspondant : akabouri@hotmail.com)

Résumé - Il s'agit d'une contribution expérimentale de contrôle non destructif, basée sur la méthode flash utilisée généralement pour mesurer la diffusivité thermique des matériaux. En effet l'élévation de la température de la face de la inférieure de l'échantillon jusqu'à sa valeur maximale est une information fondamentale des différents modèles pour déterminer la diffusivité thermique. Dans le présent travail nous exploitons cette information maximale pour proposer un système de détection des défauts dans les matériaux. Notre approche pratique, consiste à développer et tester un dispositif expérimental constitué d'un capteur thermique de contact de quarante-neuf thermocouples de type K placés sur la face inférieure d'un échantillon recevant un flash sur sa face supérieure. En effet l'augmentation du nombre de points de mesure permettra d'augmenter la résolution et la localisation de la zone présentant un défaut mais cette augmentation peut être limitée par l'influence mutuelle des capteurs entre eux. Nous avons réalisé une série des expériences sur un échantillon homogène de bois massif, de dimension 10cmx10cm et d'épaisseur 2 cm et présentant deux défauts dans deux zones différentes. Nous avons déterminé l'intervalle d'incertitude dans lequel, les mesures sont considérées comme cohérentes par rapport aux types de thermocouples utilisés. A cet effet, un thermogramme mesuré dépassant les limites de cet intervalle, est un signe de présence de défaut localisé par les coordonnées du thermocouple correspondant. En effet, les thermogrammes mesurés en zones présentant des défauts de même dimension mais de nature différente, ont des propriétés thermo-physiques différentes à celles de la zone homogène de l'échantillon testé. Nous avons présenté des résultats sous forme d'images thermiques réduites, traduisant les températures mesurés en face arrière à l'instant qui correspond aux élévations maximales des thermogrammes mesurés à l'aide de notre capteur de contact. Nous avons observé que l'évolution de la température est uniforme sur toute la surface arrière avec un écart-type mesuré $< 0,1$ °C à l'exception des deux zones de défaut où la température est nettement différente.

Nomenclature

a	diffusivité thermique, m^2s^{-1}	<i>Symboles grecs</i>	
T	température, °C	λ	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
h	coefficient d'échange, $W.m^{-2}.°C^{-1}$	θ	transformée de Laplace de T
t	temps, s	Φ	transformée de Laplace de flux
t_0	durée du Flash, s	φ_0	flux de chaleur du Dirac
S	surface, m^2	ρ	masse volumique, $Kg.m^{-3}$
p	variable de Laplace, s^{-1}	<i>Indices et exposants</i>	
e	épaisseur, m	i,j	Position du thermocouple
c	Capacité calorifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	x,y,z	Direction spatiale

1. Introduction

Le contrôle et la caractérisation non destructif des matériaux est un domaine qui a connu un essor considérable ces dernières années. Son importance est justifié par le nombre croissant de projets réalisés dans divers domaines industriels et aux multiples techniques déjà utilisées dont on peut citer l'analyse acoustique, les radiographies X, les ultrasons, les courants de Foucault, la magnétoscopie et les techniques optiques par photographie UV. D'autres approches de contrôle non destructif, dites modernes, basées sur l'observation du comportement thermique des matériaux, sont largement étudiées et ont montré leurs performances à l'épreuve d'une grande variété de problèmes [1] et [2].

Le principe utilisé dans cet article s'appuie sur la méthode flash locale. Cette méthode, initialement introduite par Parker [3] et améliorée par Degiovanni [4] et [5] a pour but de mesurer la diffusivité thermique des échantillons solides. D'autres approches sont apparues avec l'évolution technologique des divers capteurs thermiques, utilisant des techniques avancées du traitement du signal et d'images numériques pour la caractérisation thermophysiques des matériaux et la détection des défauts [6], [7], [8], [9], [10], [11].

L'objet de cet article est alors la présentation des résultats expérimentaux d'un capteur thermique de contact de quarante-neuf thermocouples de type K. Nous présentons d'abord le principe de la méthode utilisée et ensuite le dispositif expérimental mis en œuvre lors de notre étude. Nous montrons enfin, à l'aide d'une étude expérimentale sur des échantillons de bois massif où on a inséré des défauts, que l'analyse des maximums, des thermogrammes locaux, et la mesure des diffusivités thermiques permettent la détection des anomalies présentes dans les matériaux.

2. Principe de l'analyse thermique locale utilisé

Le principe utilisé, s'appuie sur la méthode flash qui consiste à exciter un échantillon sur sa face avant par un flux impulsionnel infiniment bref et réparti uniformément, et ensuite à effectuer simultanément plusieurs mesures locales de l'évolution temporelle de la température en face arrière par un capteur de contact de quarante-neuf thermocouples de type K. Ce capteur permet de pallier l'absence d'un imageur thermique qui simplifierait les mesures. L'utilisation de la méthode flash est justifiée d'une part par sa précision, sa fiabilité et sa simplicité de mise en œuvre, et d'autre part, elle est considérée comme un outil standard dans les laboratoires scientifiques et industriels du monde entier pour la détermination de la diffusivité thermique.

Pour effectuer une analyse thermique locale, nous avons mis en œuvre un capteur de température de contact, réalisé à partir d'une matrice de quarante-neuf thermocouples K de type Chromel-Alumel assemblés sous la forme de sept lignes par sept colonnes. La position de chacun des thermocouples est repérée dans le plan (oxy) de la face arrière par les coordonnées (i,j) (figure 2). Les têtes de mesures sont réalisées par soudure dans un bain à mercure et fixées par pression en contact direct avec le matériau. Les thermocouples utilisés sont conformes à la classe de tolérance n°1 définie par la Commission Electrotechnique Internationale CEI-584.2 pour les couples K.

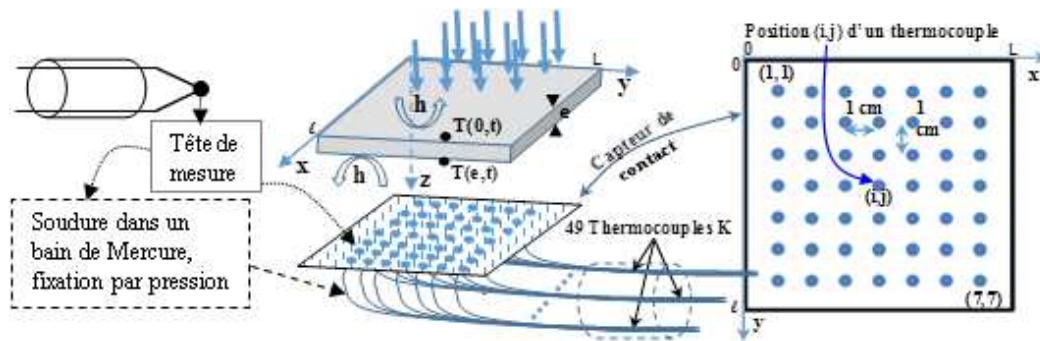


Figure 2 : Principe de la méthode d'analyse thermique locale par contact

L'analyse des maximums de l'ensemble des thermogrammes locaux mesurés simultanément en tous points de la face arrière de l'échantillon, supposé homogène, présente un grand intérêt pour l'estimation du champ de température de la face arrière et la détection de la présence des défauts. La répétition des essais des mesures en modifiant la position du capteur de contact dans chaque expérience, permet d'augmenter la résolution du maillage de la surface arrière et de diminuer le biais de la localisation des zones présentant des défauts.

3. Dispositif expérimental mis en place

Le dispositif expérimental mis en place (figure 3) est constitué d'un banc de la méthode flash. La source d'échauffement utilise deux lampes flash à halogène de 1000 W. Les dimensions des échantillons à caractériser sont parallélépipédiques $10 \times 10 \times 2 \text{ cm}^3$ ($L \times l \times e$). L'élément principal du banc est le capteur de contact de 49 thermocouples de type K monté sous la forme d'une matrice de sept lignes et sept colonnes. Ce capteur est mis en contact direct avec l'échantillon et permet de mesurer simultanément quarante-neuf thermogrammes locaux du matériau pour un seul essai. L'analyse de l'information maximale des thermogrammes mesurés, permet d'avoir un champ de température de la face arrière, offrant une analyse thermique locale en identifiant le paramètre de la diffusivité thermique pour chacune des zones en contact avec un des thermocouples du capteur. Le choix de l'information du maximum des thermogrammes, est justifié par le fait que nous sommes limités par l'incertitude du thermocouple utilisé. Puisque au maximum, nous sommes à plus de trois fois de cette incertitude. Par contre à demi monté, nous ne sommes pas très loin de celle-ci.

Le banc est constitué de deux chambres, une supérieure pour l'échauffement et l'autre inférieure pour la mesure de la température. Ces deux chambres sont isolées thermiquement de l'intérieur pour limiter les pertes et les perturbations de chaleur par les surfaces en contact avec l'extérieur. Afin d'éviter de plus les perturbations des expériences et des mesures, un système de contrôle de la température constitué d'un bain thermostaté et un échangeur thermique, est installé dans la chambre inférieure du banc. Le système est relié à une unité d'acquisition de 60 entrées liée à un ordinateur pour le traitement.



Figure 3 : Le dispositif expérimental mis en place pour l'analyse thermique locale

4. Modèle théorique

Considérons pour notre analyse thermique locale que le transfert de chaleur est unidirectionnel suivant la direction z . L'équation de la chaleur dans ce cas s'écrit :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Où $a = \lambda/\rho c$ est la diffusivité thermique de l'échantillon supposée homogène.

Le système différentiel ordinaire dans l'espace de Laplace, et qui fait intervenir les vecteurs de température et flux de chaleur transmis dans l'échantillon s'écrit :

$$\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} \theta(z, p) \\ \Phi(z, p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1/\lambda \\ -\rho c p & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta(z, p) \\ \Phi(z, p) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Intégré sur un domaine $[0, e]$, la solution du système ci-dessous s'écrit :

$$\begin{bmatrix} \theta(z = 0, p) \\ \Phi(z = 0, p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta(z = e, p) \\ \Phi(z = e, p) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Où les paramètres $A = D = \cosh(qe)$, $B = \frac{\sinh(qe)}{\lambda sq}$ et $C = \lambda sq \sinh(qe)$ dépendent de la diffusivité a du milieu, de la conductivité λ avec $q = \sqrt{\frac{p}{a}}$.

Dans le cas de la méthode Flash, la face supérieure de l'échantillon est soumise à une densité de flux de chaleur φ_0 uniforme de la forme d'un Dirac de durée t_0 très court. La température sur la face arrière dans l'espace de Laplace est donnée par :

$$\theta(e, p) = \frac{\varphi_0 (1 - e^{-pt_0})}{p C + 2Ah + Bh^2} \quad (4)$$

Après l'inversion numérique de la transformée de Laplace en utilisant la méthode Stehfest, on obtient l'expression théorique de la température dans l'espace réel. Ensuite, nous utilisons la méthode de Levenberg-Marquardt [11] pour l'estimation de paramètres susceptibles de minimiser l'écart entre le thermogramme expérimental mesuré sur la face inférieure de l'échantillon et l'expression théorique de la température.

5. Résultats et discussions

Les résultats obtenus dans cette section, sont issus de l'expérimentation avec le montage de la méthode flash décrite dans cet article. Nous avons utilisé des échantillons de dimension $10 \times 10 \times 2 \text{ cm}^3$. Le but est d'estimer les différences des maximums entre les thermogrammes en tous points de la surface arrière afin de détecter et localiser la présence des défauts.

5.1. Intervalle d'incertitude des mesures dans la zone homogène

Notre capteur de contact est conçu pour la mesure simultanément de 49 valeurs de température. Dans ce cas nous avons effectué une étude statistique sur l'incertitude des mesures afin de déterminer la plage des valeurs dans laquelle on peut considérer les mesures comme cohérentes par rapport aux thermocouples K utilisés qui sont de type Chromel-Alumel. Par la suite, on considère la totalité des mesures englobant l'incertitude du capteur, comme intervalle d'incertitude borné par une limite inférieure et supérieure égale à l'écart-type autour de la valeur moyenne.

Dans ce cadre, on a réalisé une expérimentation avec un échantillon homogène de bois de masse volumique $\rho=544\text{Kg.m}^{-3}$. Les mesures délivrées par le capteur, dans la zone homogène, doivent nécessairement appartenir à l'intervalle d'incertitude borné. A cet effet, un thermogramme dépassant la limite inférieure et supérieure est un signe de présence de défaut, localisé par les coordonnées du thermocouple correspondant.

Les résultats obtenus sont illustrés sur les thermogrammes de la figure 4. Les écarts types des fluctuations mesurés sont compris entre 0.043 et 0.101 °C (figure 4a). L'écart type tend vers sa limite supérieure lorsque l'élévation de la température atteint sa valeur maximale. La figure 4b présente un exemple de cinq thermogrammes mesurés aux positions du centre et de quatre positions sur la surface arrière à 3 cm du centre. L'ensemble des thermogrammes sont situés dans l'intervalle d'incertitude mesuré. Les écarts types estimés de la diffusivité thermique, selon les approches de Parker [3], Degiovanni [4] et modèle complet sont illustrés dans le tableau 1.

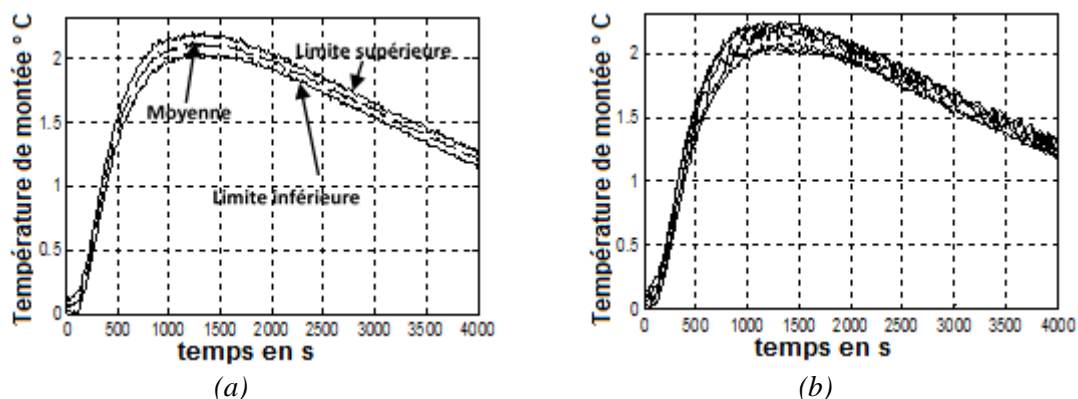


Figure 4 : (a) Intervalles d'incertitude du capteur. (b) Exemples de cinq thermogrammes mesurés

	Diffusivité thermique ($\text{m}^2/\text{s}) \times 10^{-7}$	
	Moyenne	Ecart-type
Parker	1.424	0,011
Degiovanni	1.299	0.012
Modèle complet	1.283	0.011

Tableau 1 : Diffusivité thermique moyenne d'un échantillon de bois avec son écart-type des mesures

5.2. Détection de défauts

Nous avons trouvé que dans le cas d'un échantillon homogène, l'ensemble des thermogrammes mesurés en tous points de la face arrière, appartiennent à un intervalle d'incertitude toléré par rapport au type de thermocouple utilisé. On s'intéresse à l'écart entre les élévations maximales des thermogrammes locaux, pour détecter et localiser les zones présentant de défauts de la zone homogène. La figure 5 représente un échantillon avec deux défauts insérés aux points de coordonnées (5,8) et (2,5) constituant respectivement les zones B et C. La zone A sans défaut, constitué la zone homogène.

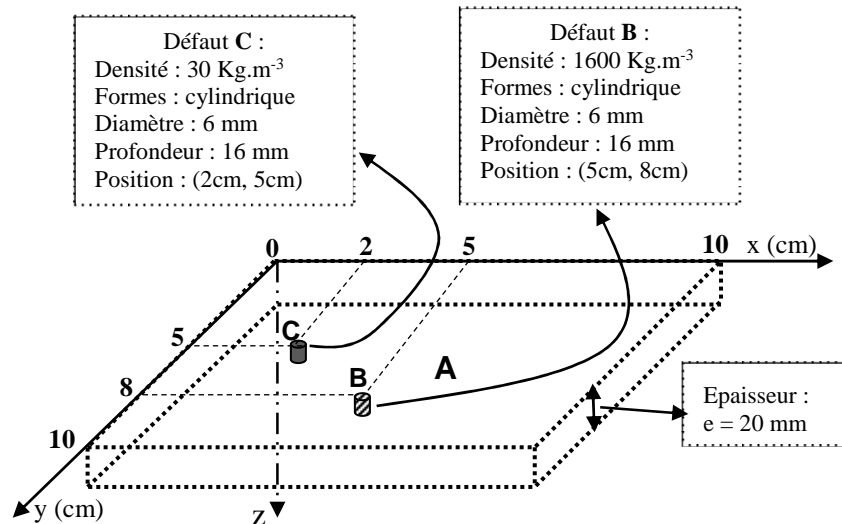
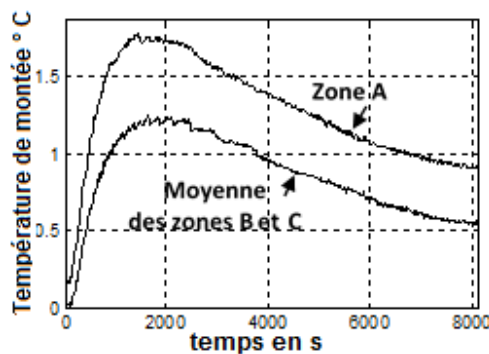


Figure 5 : Position et Profondeur des défauts B et C insérés dans le matériau homogène A

5.2.1. Détection de défauts de même nature

La zone A représente la partie homogène du bois. Les deux zones B et C de coordonnées (5,8) et (2,5) présentent des défauts de forme cylindrique de faible diamètre. Le matériau inséré dans les zones B et C est type polystyrène de masse volumique égale à 30 Kg.m⁻³. Les thermogrammes locaux de la figure 6 traduisent la moyenne des thermogrammes mesurés en plusieurs points de la face arrière pour les trois zones. Puisque tous les thermogrammes mesurés en zones B et C sont inclus dans un même intervalle d'incertitude, nous les avons représentés par leur thermogramme moyenne. Le thermogramme moyenne de la zone homogène A possède un maximum plus élevé que celle des zones B et C. L'écart moyen entre les températures maximales dans les zones présentant des défauts et la zone homogène est de 0.5128 °C. Le tableau 2 résume la moyenne des diffusivités thermiques locales mesurées dans les trois zones par les approches de Parker, Degiovanni et modèle complet. Les zones B et C avec même défaut, ont des diffusivités très proches et différentes par rapport à celle de la zone homogène.



	Diffusivité (m ² /s)x10 ⁻⁷	
	Zone A	Moyenne Zone B et C
Parker	1.234	1.122
Degiovanni	1.258	1.185
Modèle complet	1.261	1.193

Figure 6 : Thermogrammes des zones A, B et C Tableau 2 : Diffusivités locales des zones A, B et C

Les figure 7, illustrent l'image thermique réduite 3D (a) et dans le plan ox y (b) de la face arrière, obtenues à l'instant correspondant aux élévations maximales des températures mesurées. L'évolution des élévations de température est uniforme sur toute la surface arrière à l'exception des deux zones de défaut où la température est inférieure.

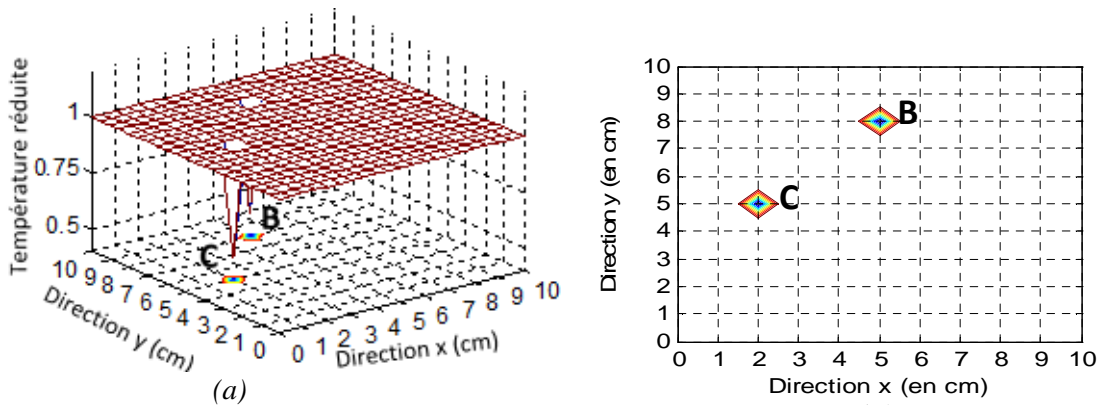
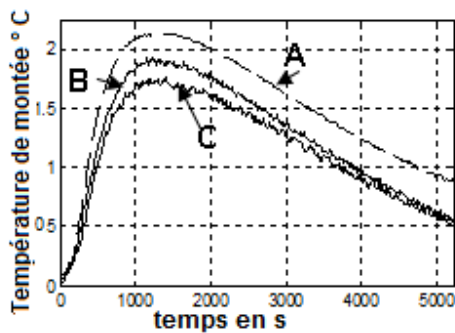


Figure 7: (a) localisation 3D des défauts détectés (b) localisation dans le plan oxy des défauts

5.2.2. Détection de défauts de nature différente

On a remplacé le défaut de la zone B par un autre de nature différente et on a gardé les zones A et C sans aucun changement. L'élévation maximale correspond au thermogramme de la zone B, a augmenté, et l'écart avec la zone homogène devient égale à $0.32\text{ }^{\circ}\text{C}$, par contre l'écart entre les zones A et C reste au voisinage de $0.52\text{ }^{\circ}\text{C}$ (figure 8). Le tableau 3 résume la moyenne des diffusivités thermiques locales, mesurées dans les trois zones selon les mêmes approches que dans le cas de la détection de défauts de même nature.



	Diffusivité ($\text{m}^2/\text{s}) \times 10^{-7}$		
	Zone A	Zone B	Zone C
Parker	1.354	1.234	1.154
Degiovanni	1.281	1.105	1.145
Modèle complet	1.277	1.158	1.161

Figure 8 : Thermogrammes des zones A, B et C Tableau 3 : Diffusivités locales des zones A, B et C

Les figures 9 (a) et (b), représentent l'image thermique réduite 3D et dans le plan oxy, correspondent aux élévations maximales des températures mesurées. L'évolution de la température est uniforme sur toute la surface à l'exception des deux zones de défaut où l'élévation de la température est inférieure.

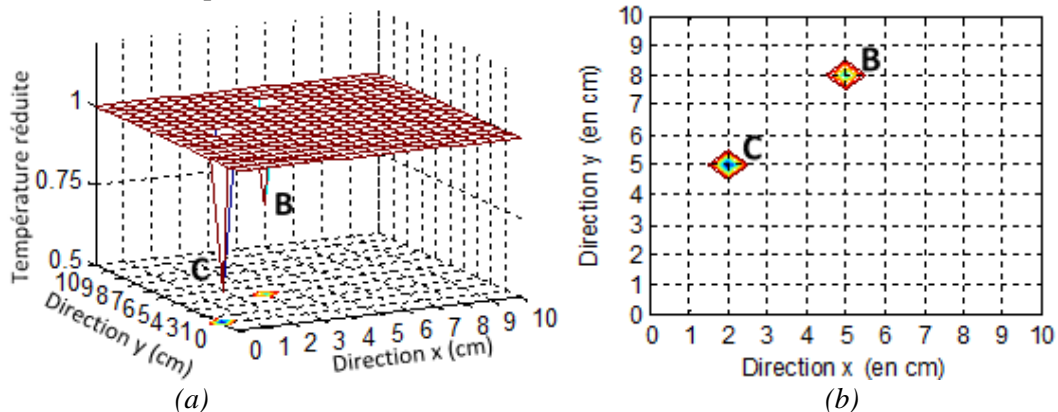


Figure 9 : (a) localisation 3D des défauts détectés (b) localisation dans le plan oxy des défauts

6. Conclusion

La méthode d'analyse thermique locale par contact, proposée est une méthode particulièrement intéressante pour la caractérisation et la détection de défauts dans les matériaux homogènes. En effet, leur principe s'inspire de la méthode Flash en comparant les élévations maximales de températures générées en tous points de la face arrière. La méthode Flash, développée dont le but est l'estimation de la diffusivité thermique, est utilisée pour établir un champ des températures maximales de la face arrière à partir des thermogrammes locaux mesurés. Nous avons réalisé des tests sur un matériau de bois incluant différents types de défauts. Les résultats obtenus, en considérant un transfert de chaleur unidirectionnel dans le sens z, sont intéressants pour la détection d'un défaut et de l'estimation de sa position et sa nature thermique. La méthode développée dans le cadre de ce travail exploite l'information de l'élévation maximale de la température à tous point de la face arrière de l'échantillon. En effet, une élévation dépassant l'écart toléré dans la partie homogène de l'échantillon est un signe de présence d'un défaut. Bien évidemment, plus le nombre de points de mesure augmente, plus la localisation du défaut, est meilleure. Mais nous sommes limités par le nombre, l'incertitude, la sensibilité des capteurs et leur influence mutuelle.

Références Bibliographiques

- [1] M. Bamford, J.C. Batsale, O. Fudym "Nodal and modal strategies for longitudinal thermal diffusivity profile estimation: Application to the nondestructive evaluation of SiC/SiC composites under uniaxial tensile tests" *Infrared Physics and Technology*, 52(1):1– 13, 2009.
- [2] Vladimir P. Vavilov "Modeling thermal NDT problems" *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 72 (2014) 75–86.
- [3] Parker W.J., Jenkins R.J., Butler C.P. et Abbott G.L., "Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity, and Thermal Conductivity", *J. Appl. Phys.*, 32, 9, 1961, 1679-1684.
- [4] Degiovanni A. « Diffusivité et méthode Flash » *Revue générale de thermique*, N°185, 420–442, Mai 1977.
- [5] Degiovanni A. et Laurent M., « Une nouvelle technique d'identification de la diffusivité thermique par la méthode flash », *Rev. Phys. Appl.*, 21, 1986, 229-237.
- [6] KRAPEZ J.C., SPAGNOLO L., FRIEB M., MAIER H.P. NETTER F., "Measurement of in-plane diffusivity in non-homogeneous slabs by applying flash thermography", *International Journal of Thermal Sciences* 43 967-977, 2004.
- [7] J.C. Batsale, C. Pradère et V. Ayvazyan : Estimation de cartographies de diffusivité thermique par thermographie infrarouge. 19ème Congrès Français de Mécanique, Marseille, 24-28 Août 2009.
- [8] Cherki A., B. Remy, A. Khabbazi, Y. Jannot, D. Baillis; « Experimental thermal properties characterization of insulating cork–gypsum composite » *Construction and Building Materials* 54 (2014) 202–209
- [9] Cherki A, Khabbazi A, Remy B, Baillis D. Granular cork content dependence of thermal diffusivity, thermal conductivity and heat capacity of the composite material/Granular cork bound with plaster. *Energy Proc* 2013; 42:83–92.
- [10] I. Philippi, J.C. Batsale, D. Maillat et A. Degiovanni « Measurement of thermal diffusivities through processing of infrared images » *Review of Scientific Instruments*, 66(1):182–192, 1995.
- [11] S. Brahim1, J.L. Bodnar, P. Grossel, P. Hervé « Analyses photothermiques face arrière sous excitation aléatoire et analyse paramétrique : application à la mesure de diffusivité thermique » *Congrès Français de Thermique, SFT 2007, Île des Embiez*, 29 mai - 1 juin 2007
- [12] Marquart D. An algorithm for least squares estimation of non-linear parameters. *Soc Ind Appl Math* 1963; 11:431–41.