



## Détection locale des défauts dans les matériaux par analyse thermique surfacique avec contact

Ahmed Kabouri<sup>1</sup>, Abdelhamid Khabbazi<sup>2</sup>, Hussein 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 :** Il s'agit d'une approche expérimentale de caractérisation et de détection de défauts dans les milieux homogènes par la méthode Flash, en comparant les élévations maximales des thermogrammes générées en face arrière de l'échantillon à caractériser. Cependant, nous avons conçu et réalisé un dispositif expérimental constitué d'un capteur thermique de contact de quarante-neuf thermocouples de type K, placé sur la face inférieure d'un échantillon recevant un Flash sur sa face supérieure. Les réponses des thermocouples traduites par plusieurs thermogrammes, sont mesurées simultanément en plusieurs points de la surface arrière. L'analyse des résultats expérimentaux, montre que les élévations de température fournissent des informations importantes pour la mesure de la diffusivité et établir un système de détection de défauts dans les matériaux à caractériser. En effet, nous avons inséré dans un échantillon homogène, des défauts dont les positions et les tailles sont connues. Par la suite, nous avons effectué des expériences par la méthode Flash afin de localiser ses défauts et d'estimer leurs étendues.

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

### 1. Introduction

La thermo-détection ou détection des défauts dans les matériaux homogènes par thermographie, est une technique qui a été développée depuis de nombreuses années. Leur principe est basé sur l'analyse des réponses aux excitations thermiques, et l'établissement d'une relation entre ces réponses et les imperfections qu'elles contiennent. En effet, cette technique permet, d'une part de mesurer l'énergie thermique transmise par les échantillons à tester, et d'autre part d'identifier les zones de pertes de chaleur par suite de défauts [1-4].

On s'intéresse dans cette étude à l'adoption d'une démarche essentiellement expérimentale qui consiste à analyser localement le comportement thermique de la face arrière et d'estimer les zones présentant des hétérogénéités et de mesurer leurs étendues. En effet, le principe que nous avons utilisé, s'appuie sur la méthode flash initialement introduite par Parker [5], améliorée par Degiovanni [6] et utilisée par plusieurs chercheurs pour la caractérisation thermophysique des matériaux composites [7-8]. Cependant, nous avons conçu et réalisé un dispositif expérimental constitué d'un capteur thermique 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. Ce capteur est placé en contact avec la face arrière d'un échantillon de bois où on a inséré des défauts. L'autre face, reçoit un Flash à partir d'une source d'excitation de deux lampes à halogènes de 1000 W.

L'analyse des thermogrammes locaux mesurés simultanément, fournis des informations importantes pour établir un système thermique de détection de défauts dans le matériau homogène. En effet, la comparaison des élévations maximales des thermogrammes mesurés entre eux, permet la création de N classes ( $N \geq 1$ ) où chaque classe est représentée par un thermogramme moyenne et un écart-type inférieur à  $0.1^\circ\text{C}$ . Dans le cas où  $N=1$ , l'échantillon à tester est considéré comme homogène. Si non ( $N > 1$ ), l'échantillon présente au moins ( $N-1$ ) défauts. Les zones de défauts sont détectées à partir des thermogrammes qui présentent un gradient par rapport à celle de la classe de la zone homogène. Les défauts sont localisés par les coordonnées des thermocouples en contact avec les zones détectées dans le plan de la face arrière. L'estimation de l'étendue des défauts est obtenue en augmentant la résolution du capteur par déplacement des têtes des thermocouples autour des défauts.

## 2. Dispositif expérimental et principe de mesure utilisé

L'élément principal de notre dispositif expérimental (figure 1), est un capteur de contact de 49 thermocouples de type K, monté sous forme d'une matrice de sept lignes et sept colonnes. Ce capteur est mis en contact avec un échantillon en bois massif présentant des défauts, et permet de mesurer simultanément 49 thermogrammes locaux pour une seule expérience (figure 2).

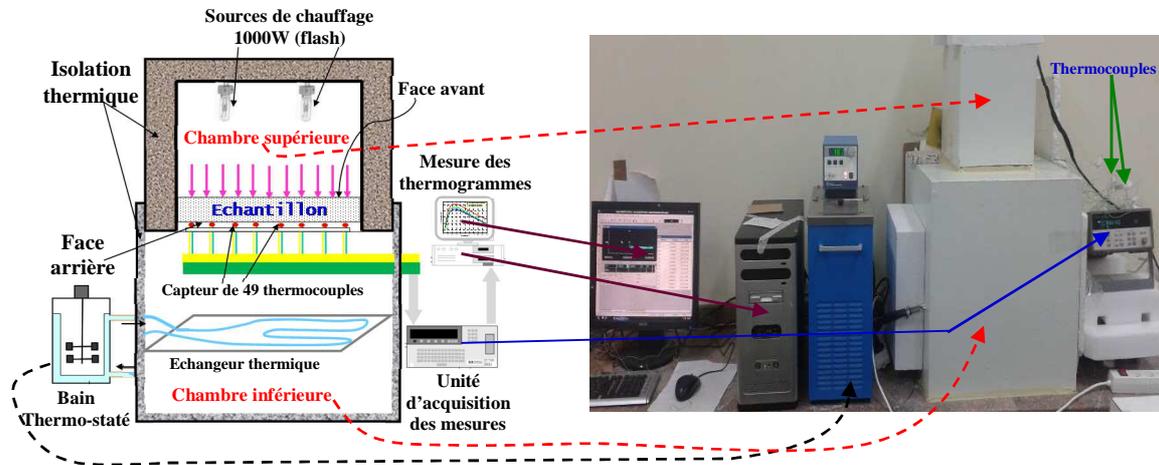


Figure 1 : Schéma et photo du banc d'essais mis en place

Nous avons réalisé deux capteurs avec différente résolution dans le but d'effectuer un maillage sur toute la surface arrière afin de localiser les zones de défauts dans un premier temps, et d'estimer leurs superficies dans un deuxième temps.

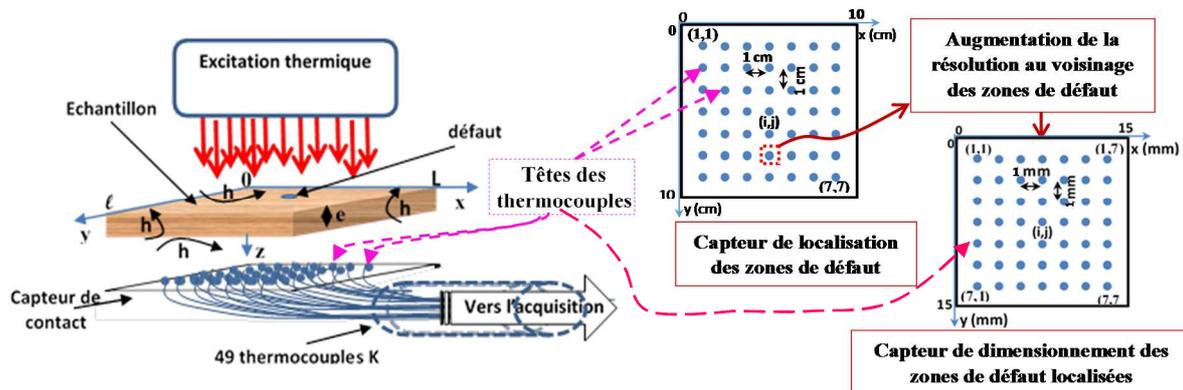


Figure 2 : Schéma du principe utilisé pour le dimensionnement des zones de défauts localisées

Les thermocouples du capteur sont fixés en des points équidistants, et sont localisés par des coordonnées  $(i,j)$  dans le plan  $oxy$  comme montre la figure 2. Dans le cas où on désire localiser la zone de défaut, on utilise un capteur de contact dont la distance entre les thermocouples est de un centimètre. Pour l'estimation de l'étendue de la zone de défaut localisée, on rapproche les thermocouples à un millimètre.

## 3. Modèle théorique

On considère dans notre approche que le transfert de chaleur local est unidirectionnel suivant la direction  $z$ . En effet, notre capteur de contact est constitué de 49 thermocouples repartis de façon équidistante. Si on désigne par  $(i,j)$  les coordonnées d'un point de mesure de la face arrière de l'échantillon à tester, l'équation de la chaleur locale au voisinage du point  $(i,j)$  s'écrit :

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

Où  $a_{ij}$  est la diffusivité thermique locale.

Dans le cas de la méthode Flash, la face avant de l'échantillon est soumise à une densité de flux de chaleur  $\varphi_0$  uniforme de courte durée  $t_0$ . La température locale au voisinage du point  $(i,j)$  sur la face arrière dans l'espace de Laplace est donnée par :

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

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  $\alpha_{ij}$  du milieu, de la conductivité  $\lambda_{ij}$  avec  $q_{ij} = \sqrt{p/a_{ij}}$  et du coefficient de convection  $h$  sur les deux faces. Si les paramètres  $a_{ij}$ ,  $\lambda_{ij}$ ,  $h$  et  $\varphi_0$  sont supposés connus, l'expression de la température locale dans l'espace réel peut se calculer en appliquant la méthode de Stehfest :

$$T_{ij}(e, t) = \frac{\text{Ln}(2)}{t} \sum_{m=1}^M V_m \theta_{ij} \left( \frac{m \cdot \text{Ln}(2)}{t} \right) \quad (3)$$

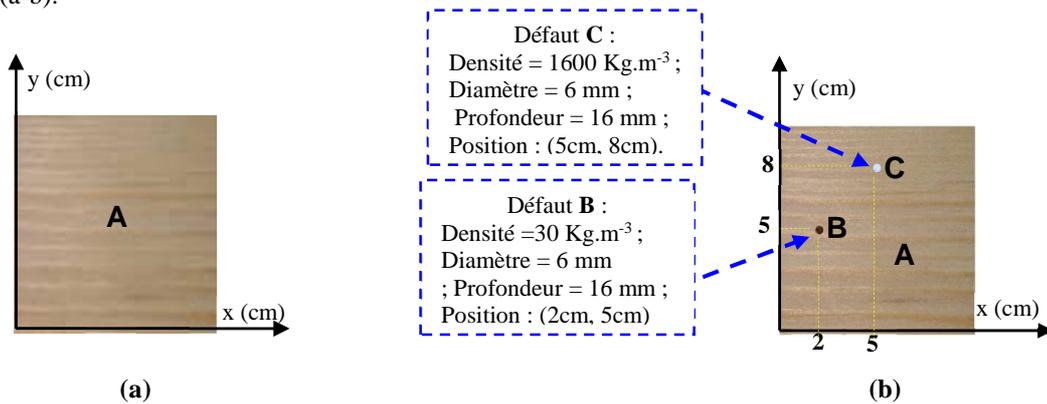
Où  $\theta$  est la fonction donnée par la relation (2).

Ensuite, nous utilisons l'algorithme de Levenberg-Marquardt pour l'estimation de paramètres thermophysiques susceptibles de minimiser l'écart entre le thermogramme expérimental mesuré sur la face inférieure de l'échantillon et l'expression théorique de la température (modèle concurrence). En outre, les thermogrammes expérimentaux sont utilisés pour calculer les valeurs expérimentales des diffusivités thermiques locales par le modèle de Parker [5] et le modèle de Degioavanni [6] afin de comparer ces valeurs avec celles du modèle complet (relations (2-3)).

## 5. Résultats et discussions

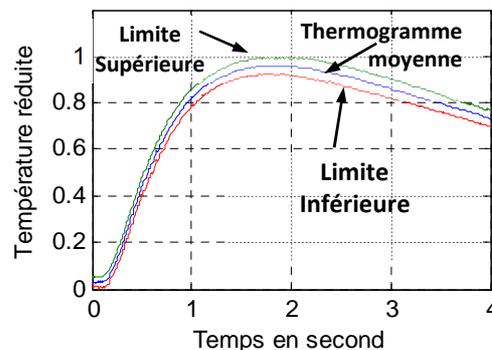
### 5.1. Intervalle d'incertitude du capteur

Dans le but 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  $\rho=544\text{Kg.m}^{-3}$ , et de dimension  $10 \times 10 \times 2 \text{ cm}^3$ . Ensuite, nous avons inséré des défauts dans des zones B et C localement connu comme indique les figures 3(a-b).



**Figure 3 :** Matériau à tester en bois massif d'épaisseur 20 mm : (a) homogène, (b) en présence de deux défauts

Notre capteur de contact est conçu pour la mesure simultanément de 49 valeurs de température. Dans ce cas nous avons effectué une étude statistique de l'incertitude des mesures sur un échantillon homogène de la **figure 3-a** sans présence de défauts. Nous avons déterminé expérimentalement la plage des valeurs à laquelle les mesures sont considérées comme cohérentes par rapport aux thermocouples K utilisés qui sont de type Chromel -Alumel. Les résultats obtenus sur la **figure 4**, montrent que la totalité des mesures englobant l'incertitude du capteur, appartiennent à un intervalle d'incertitude borné par une limite inférieure et supérieure égale à un écart-type inférieur à 0.101 autour de la valeur moyenne.



**Figure 4 :** Intervalles d'incertitude du capteur

## 5.2. Détection et estimation de l'étendue des défauts

Dans cette partie, le matériau à tester est celle de la Figure 3-b. La zone A, représente la partie homogène du matériau. Les caractéristiques physiques des zones de défauts B et C, sont illustrées dans la même Figure 3-b. Nous avons utilisé un capteur avec les têtes des thermocouples qui sont équidistants de 1 cm afin de localiser les zones de défauts. Les résultats obtenus sur la Figure 5-a, traduisent les moyennes des thermogrammes locaux mesurés en 49 points de la face arrière, qui sont répartis selon les amplitudes de leurs élévations maximales, dans trois classes où chaque classe est représentée par un thermogramme moyenne et un écart-type inférieur à 0.1 °C. L'écart de la température  $\Delta T$  au moment des élévations maximales, entre la zone homogène A et les deux zones de défauts détectées B (2 cm, 5 cm) et C (5 cm, 8 cm) est respectivement d'environ  $\Delta T_1 = 0.54$  °C et  $\Delta T_2 = 0.34$  °C. La Figure (5-b) montre l'évolution du comportement thermique de la face arrière obtenue à l'instant correspondant aux élévations maximales des températures mesurées. L'évolution de la température dans la partie homogène, est uniforme sur toute la surface arrière avec un écart-type mesuré < 0,1 °C à l'exception des deux zones de défaut détectées B et C où l'écart est supérieur à 0.1 °C.

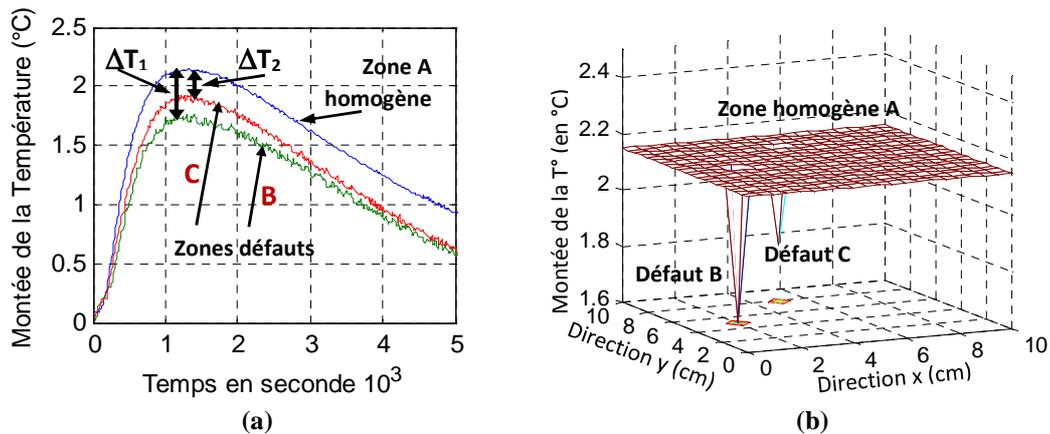


Figure 5 : (a) Thermogrammes moyennes mesurés dans trois zones A, B et C ; (b) Comportement thermique de la face arrière à l'instant des élévations maximales.

Le Tableau 1 illustre les moyennes des diffusivités thermiques locales, mesurées dans les trois zones A, B et C. Les zones B et C présentent des diffusivité thermiques légèrement différentes de celle de la zone A homogène.

Tableau 1 : Diffusivités locales des zones : homogène A et des défauts B et C

	Diffusivité thermique $\times 10^{-7}$ $m^2.s$		
	Parker	Degiovanni	Modèle complet
Zone homogène A	1.354	1.281	1.277
Zone de défaut B	1.234	1.105	1.158
Zone de défaut C	1.277	1.158	1.161

Nous avons considéré le même échantillon de la figure 3-b où les zones des défauts B et C, sont bien localisées respectivement aux points de coordonnées (5 cm, 8 cm) et (2 cm, 5 cm). Ensuite, on augmente la résolution du capteur en rapprochant les têtes des thermocouples entre eux jusqu'au 1 mm (Figure 2). Cette nouvelle configuration du capteur est appliqué localement au voisinage des zones B et C afin d'estimer leurs étendues. En effet, les résultats obtenus, sont illustrés sur les Figures 6 (a et b) sous forme d'images thermiques, déduites à partir des élévations maximales des 49-thermogrammes mesurés. La position des zones B et C de défauts sont respectivement bien centrées sur les points de coordonnées B(5cm,8cm) et C(2cm,5cm).

Par la suite, nous avons projeté les champs obtenus au voisinage des zones de défauts, suivant les directions  $ox$  et  $oy$  dans le plan de la face arrière. Pour chaque zone, nous avons obtenu deux sous-champs de température selon les directions respective  $ox$  et  $oy$ . Les graphes de la Figure 7 représentent les variations des élévations maximales des sous champs obtenus, en fonction de la position des thermocouples dans les zones B et C. On constate que les valeurs de la température dans la zone B est nettement inférieure par rapport à son entourage constitué par la zone homogène A, selon les directions  $ox$  et  $oy$  de la face arrière. La valeur estimée de l'écart de la température entre les deux zones est d'environ  $\Delta T_1 = 0.54$ °C. L'estimation du diamètre de la tâche du défaut B suivant les deux directions est de l'ordre de 6 mm, soit environ une surface de 0.36 cm<sup>2</sup>. Pour la zone C, on a trouvé les mêmes variations, avec un écart de la température  $\Delta T_2 = 0.34$  °C et une étendue de 0.36 cm<sup>2</sup> d'environ.

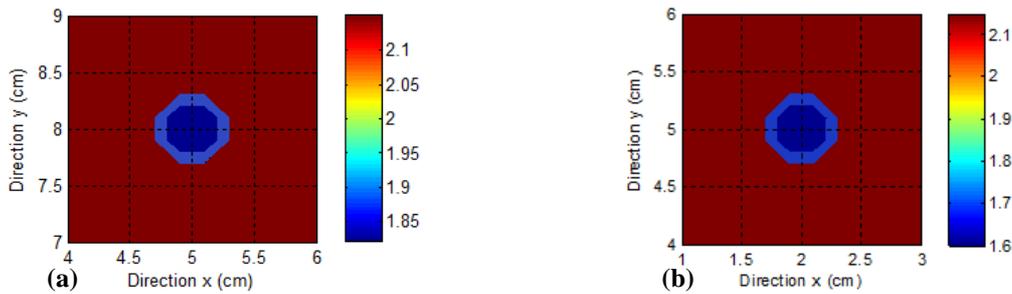


Figure 6 : Image thermique réduite locale au voisinage de : (a) zone B (2cm,5cm) et (b) zone C (5cm,8cm)

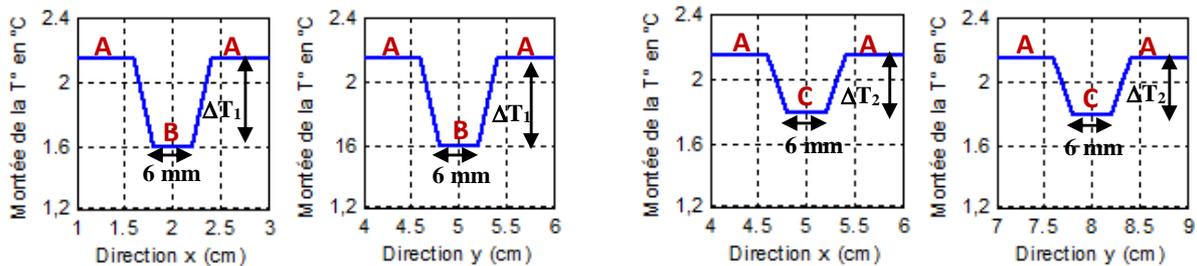


Figure 7 : Variation de la température au voisinage des zones de défauts B et C selon les directions x et y

## 6. Conclusion

La méthode proposée dans cet article, est une contribution pour la détection de défauts dans les matériaux homogènes, en utilisant un capteur de contact à faible coût. En effet, leur principe s'inspire de la méthode Flash en comparant les élévations maximales des thermogrammes générés en face arrière pour établir un système de détection des défauts. Nous avons réalisé des tests sur un matériau de bois incluant différents types de défauts. Les résultats obtenus sont intéressants pour la localisation et l'estimation de l'étendue des défauts. Bien évidemment, plus le nombre de points de mesure augmente, plus les résultats sont meilleurs. D'autres études, sont en cours, concernant la fiabilité et la propagation d'incertitudes dans les mesures selon l'approche probabiliste et ensembliste basée sur l'analyse par intervalle ainsi que l'introduction des techniques de traitement du signal.

## Nomenclature

$a_{ij}$	diffusivité thermique locale, $m^2 \cdot s^{-1}$
$T$	température, $^{\circ}C$
$h$	coefficient d'échange, $W \cdot m^{-2} \cdot ^{\circ}C^{-1}$
$t$	temps, $s$
$t_0$	durée du Flash, $s$
$S$	surface, $m^2$
$p$	variable de Laplace, $s^{-1}$
$e$	épaisseur, $m$

### Symboles grecs

$\lambda_{ij}$	conductivité thermique locale, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$\theta$	transformée de Laplace de $T$
$\varphi_0$	flux de chaleur du Dirac
$\rho$	masse volumique, $Kg \cdot m^{-3}$

### Indices et exposants

$i, j$	Position du thermocouple
$x, y, z$	Direction spatiale

## Références

- [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] A. Kabouri, A. Khabbazi, H. Youlal "Approche expérimentale d'analyse thermique locale par contact pour le contrôle non destructif" Actes du congrès SFT 26-29 Mai 2015 - La Rochelle - France.
- [4] A. Kabouri, A. Khabbazi, H. Youlal "Analysis of a thermal system by contact for defect detection in homogeneous materials" Acts of International conference ICoME 19-22 Mai 2015 – Tétouan - Maroc.
- [5] 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.
- [6] Degiovanni A. « Diffusivité et méthode Flash » *Revue générale de thermique*, N°185, 420–442, Mai 1977.
- [7] Cherki A., B. Remy, A. Khabbazi, Y. Jannot, D. Baillis; «Experimental thermal properties characterization of insulating cork–gypsum composite» *Construction and Building Materials* 2014, 54, 202–209.
- [8] 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.