



**HAL**  
open science

## Contribution à l'estimation locale d'effusivité thermique par thermographie infrarouge stimulée

Kamel Mouhoubi, Jean-Luc Bodnar, Jean-Marc Vallet, Vincent Detalle

### ► To cite this version:

Kamel Mouhoubi, Jean-Luc Bodnar, Jean-Marc Vallet, Vincent Detalle. Contribution à l'estimation locale d'effusivité thermique par thermographie infrarouge stimulée. Thermique et Sciences de l'information, May 2018, Pau, France. hal-02098177

**HAL Id: hal-02098177**

**<https://hal.science/hal-02098177>**

Submitted on 12 Apr 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Contribution à l'estimation locale d'effusivité thermique par thermographie infrarouge stimulée

Kamel Mouhoubi<sup>1</sup>, Jean-Luc Bodnar<sup>1</sup>, Jean-Marc Vallet<sup>2</sup>, Vincent Detalle<sup>3</sup>

<sup>1</sup>GRESPI / CATHERM, UFR Sciences Exactes et Naturelles, BP 1039, 51687 Reims cedex 02

<sup>2</sup>Centre Interdisciplinaire de Conservation et Restauration du Patrimoine (CICRP), 21 rue Guibal, 13003 Marseille

<sup>3</sup>C2RMF, Palais du Louvre – Porte des Lions, 14, quai François Mitterrand, 75001 Paris

**Résumé :** Notre laboratoire s'est spécialisé dans l'étude des altérations affectant les œuvres d'art telles que les fresques [1,2]. L'effusivité thermique est une quantité thermophysique qui nous permet de repérer des altérations ou de mettre en évidence des contaminations d'espèces chimiques dans ces œuvres telles que les sels hygroscopiques. Les deux approches présentées ici, basées sur l'analyse de la diffusion latérale de la chaleur suite à une excitation laser locale, permettent d'aboutir à une bonne estimation de cette grandeur thermophysique, ceci indépendamment de l'épaisseur des échantillons et sans prélèvement (ce qui est un atout pour l'analyse des œuvres d'art).

**Mots-clefs :** thermographie infrarouge stimulée, caractérisation thermique, effusivité, contrôle non destructif, laser

## Nomenclature

$a$	Diffusivité thermique, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$t$	Temps, s
$b$	Effusivité thermique, $\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}$	$T$	Température, K
$c$	Capacité thermique, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	<i>Symboles grecs</i>	
$F$	Transformée de Fourier	$\delta(t)$	Fonction de Dirac
$H$	Transformée de Hankel	$\lambda$	Conductivité thermique, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
$I(t)$	Intégrale de surface, K	$\rho$	Masse volumique, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
$Q$	Énergie totale (du faisceau), J	$\theta$	Coordonnée angulaire, rad
$Q'$	Terme équivalent à une densité d'énergie, $\text{J} \cdot \text{m}^{-1}$	<i>Indices et exposants</i>	
$R$	Rayon du spot laser, m	ref	Référence
$r$	Coordonnée cylindrique, m	inc	Inconnu

## 1 Introduction

Notre laboratoire travaille depuis plus de 15 ans dans le domaine de l'aide à la conservation du patrimoine culturel par thermographie infrarouge stimulée. Après avoir montré les possibilités de la méthode en termes de détection de défauts structurels, nous travaillons actuellement à la détection de pollutions par sels hygroscopiques. L'approche suivie consiste à essayer de détecter ces polluants par analyse thermique. L'idée est que la présence de sels modifie les propriétés thermophysiques locales des œuvres d'art. Dans le cas des peintures murales, l'épaisseur des échantillons ne permet pas l'utilisation des méthodes d'estimation

transversales de propriétés thermophysiques. Nous nous sommes alors tournés vers l'utilisation d'une méthode de mesure longitudinale. Cette dernière met en œuvre une excitation laser locale et l'étude de la diffusion latérale de la chaleur. Dans ce travail, nous montrons que cette approche permet une bonne approximation du paramètre effusivité thermique. Notre présentation se décompose en quatre étapes : Nous présentons l'approche théorique de notre étude, nous présentons ensuite les échantillons étudiés et le dispositif expérimental mis en œuvre, enfin, nous présentons les résultats obtenus.

## 2 Le modèle théorique développé pour l'étude

Le mode opératoire de la méthode d'estimation d'effusivité thermique longitudinale développée pour l'étude est le suivant – voir aussi [3] : Un échantillon est soumis sur sa face avant à une excitation laser localisée. Cette excitation est temporellement proche d'un delta de Dirac  $\delta(t)$  et est spatialement de forme gaussienne. La mesure de l'évolution spatio-temporelle du champ de température induite par cette excitation, à l'aide d'une caméra de thermographie infrarouge permet de remonter à l'aide d'un post-traitement mathématique, à la valeur de l'effusivité thermique du matériau.

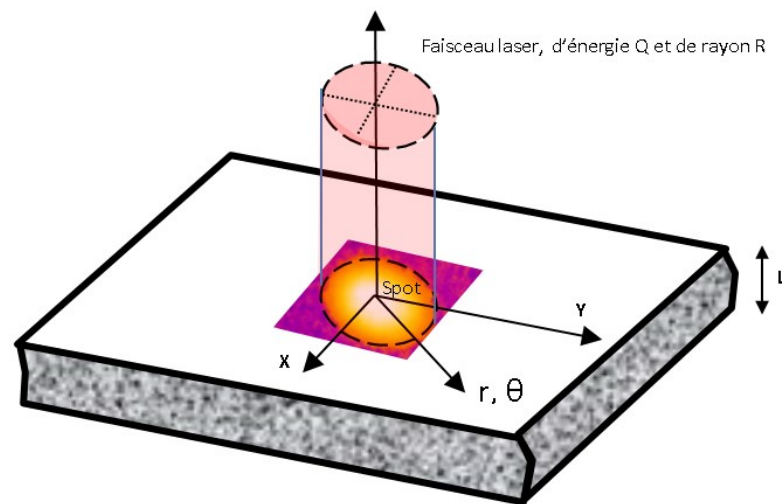


Figure 1 : Le mode opératoire mis en œuvre pour l'étude

Examinons en détail ce post-traitement mathématique sur lequel est fondée cette technique de mesure. Soit une plaque d'épaisseur  $L$ , semi infinie en  $r$ . Soit une perturbation thermique très brève (Fonction delta de Dirac  $\delta(t)$ ), et de forme gaussienne spatialement. Cette excitation est appliquée à l'instant initial  $t = 0$  au centre de la plaque afin de s'affranchir des effets de bord. Soit  $R$ , le rayon caractéristique de cette tâche d'excitation (mesurée à  $Q_{\max}/e^2$ ). Soit  $\lambda$ ,  $\rho$ ,  $c$  et  $a$ , respectivement, la conductivité thermique, la masse volumique, la capacité calorifique et la diffusivité thermique du matériau constitutif de la plaque étudiée. L'échantillon est initialement en équilibre thermique avec son environnement. Enfin, dans ce modèle nous négligerons les échanges convecto-radiatifs entre l'échantillon étudié et l'environnement. La traduction mathématique de ces hypothèses conduit au système différentiel suivant :

$$\Delta T(r, z, t) = \frac{1}{a} \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} \quad (1)$$

$$\text{En } z = 0 : -\lambda \frac{\partial T(r, 0, t)}{\partial t} = \frac{2Q}{\pi R^2} \text{Exp}\left(-\frac{2r^2}{R^2}\right) \delta(t) \quad (2)$$

$$\text{En } z = L : -\lambda \frac{\partial T(r, L, t)}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

$$\text{à } t = 0 : T = T_{\text{ext}}$$

La résolution de ce système différentiel met en œuvre deux transformations intégrales ; d'une part une transformation de Hankel d'ordre 0 sur l'axe r (4)

$$H_0 \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} \right) \right] = -\sigma^2 \int_0^\infty r J_0(\sigma r) T(r, z, t) dr \quad (4)$$

et d'autre part, une transformation de Fourier par rapport au temps (5) :

$$F \left( \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} \right) = \frac{i\omega}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} T(r, z, t) \text{Exp}(-i\omega t) dt \quad (5)$$

Elle permet d'aboutir à l'expression de l'évolution spatio-temporelle de la température en face avant de l'échantillon étudié donnée par la formule (6) :

$$T(r, 0, t) = \frac{2Q}{b\sqrt{\pi^3 t}} \cdot \frac{1}{R^2 + 8at} \cdot \text{Exp}\left(\frac{2r^2}{R^2 + 8at}\right) \quad (6)$$

En considérant maintenant les conditions expérimentales classiquement rencontrées dans notre étude : soit un rayon d'excitation de  $R = 1$  cm, une diffusivité thermique  $a$  égale à  $8,15 \cdot 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s et une durée d'analyse  $t = 0,2$  s, le terme  $8at$  devient négligeable dans le terme  $R^2$  et la formule (6) devient alors :

$$T(r, 0, t) \approx \frac{2Q}{b\sqrt{\pi^3 t}} \cdot \frac{1}{R^2} \cdot \exp\left(-\frac{2r^2}{R^2}\right) \quad (7)$$

Si maintenant la mesure se fait au centre de la tache thermique, soit en  $r = 0$ , alors cette expression devient :

$$T(r, 0, t) \approx \frac{2Q}{b\sqrt{\pi^3 t}} \cdot \frac{1}{R^2} \quad (8)$$

En posant maintenant  $Q' = \frac{2Q}{\pi R^2}$  il est possible de réécrire l'expression précédente sous la forme :

$$T(t) = \frac{Q'}{b\sqrt{\pi t}} \quad (9)$$

On retrouve alors une allure d'expression proche de celle obtenue lors d'une estimation d'effusivité thermique par une excitation flash étendue. Pour aboutir à l'estimation locale du paramètre effusivité thermique, nous proposons comme dans ce cas de mettre en œuvre une méthode de comparaison. Ainsi en déposant la même énergie sur l'échantillon à analyser et sur un échantillon de référence à effusivité connue, il est possible d'aboutir à l'estimation de l'effusivité recherchée à l'aide de la formule suivante :

$$b_{inc} = \frac{T_{ref}(0,t)}{T_{inc}(0,t)} b_{ref} \quad (10)$$

### 3 Les échantillons étudiés et le système expérimental mis en œuvre lors de l'étude

Pour notre étude, nous avons à notre disposition 6 échantillons calibrés. Il s'agit de deux échantillons de PVC (échantillon A et échantillon de référence), d'un échantillon de bakélite (échantillon B) et de trois échantillons de nylon (échantillon C à E). Leurs dimensions géométriques sont les suivantes : une longueur de 40 mm une largeur de 40 mm. L'échantillon de référence a une épaisseur de 10 mm et les cinq autres ont une épaisseur de 3 mm. Ils ont tous été recouverts d'une fine couche de peinture noire afin d'homogénéiser leurs propriétés radiatives (figure 2).

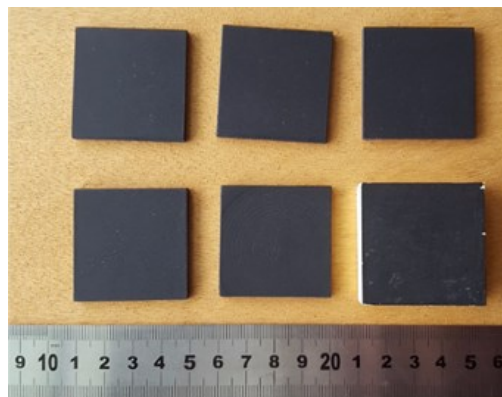


Figure 2 : Les échantillons étudiés

Leur effusivité thermique a été mesurée à l'aide du dispositif DICO – décrit dans les publications suivantes [4, 5] – du laboratoire CERTES de l'université de Paris Sud. Les valeurs fournis par ce laboratoire sont regroupées dans le tableau 1.

	Référence PVC	Ech A	Ech B	Ech C	Ech D	Ech E
b de référence (J.m-2.K-1.s-1/2)	408	345	471	358	555	611

Tableau 1 : Les valeurs d'effusivité mesurées à l'aide du dispositif DICO du laboratoire CERTES.

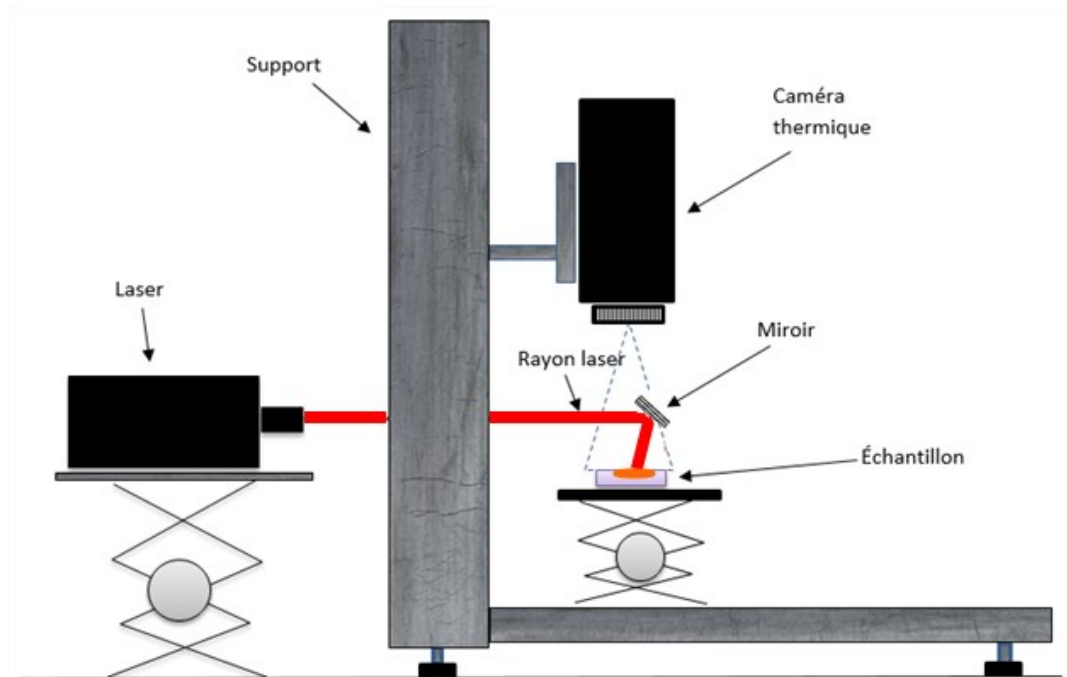


Figure 3 : Schéma du dispositif expérimental mis en œuvre

Le dispositif expérimental mis en œuvre est d'abord d'un statif mécanique en profilés microcontrôle. La base de ce statif est une plaque pleine de duralumin de 40 cm de largeur et de 50 cm de longueur. Son épaisseur est égale à 2 cm. Ces dimensions ont été choisies de façon à assurer une bonne stabilité au dispositif expérimental. Cette plaque est posée sur des pieds réglables en hauteur afin de permettre un réglage fin de la planéité de l'expérience. A l'une des extrémités de cette plaque est fixée un profilé en X microcontrôle de 95 mm de côté et de 85 cm de hauteur. Sur ce profilé sont positionnés deux cavaliers. Le premier permet la fixation de de la caméra de thermographie infrarouge. Le second, muni d'une vis microcontrôle de déplacement fin permet un positionnement précis de la caméra de thermographie infrarouge.

Le dispositif expérimental mis en œuvre est ensuite composé d'une optique d'excitation. Il s'agit d'une diode laser de type AMS. Sa puissance maximale est de 3,5 W. Sa longueur d'onde d'émission est égale à 0,810  $\mu\text{m}$ . Elle pilotée par une électronique de contrôle et de synchronisation avec la caméra de thermographie infrarouge. Le laser est positionné sur une dispositif microcontrôle permettant son positionnement fin. Un miroir de renvoi en aluminium, placé environ à 45 degrés permet l'excitation de l'échantillon étudié.

Enfin le dispositif expérimental mis en oeuvre est composé d'une caméra de thermographie infrarouge. Il s'agit d'une caméra à bolomètres de type FLIR SC655 munie d'un objectif de macro thermographie. Ces choix sont justifiés par les constantes de temps importantes des échantillons étudiés et par les dimensions centimétriques de l'excitation laser (figure 3).

## 4 Les résultats expérimentaux obtenus

Les 6 échantillons ont été étudiés à l'aide de ce dispositif expérimental. Les conditions expérimentales retenues sont les suivantes : une durée d'excitation de 20 ms, une fréquence d'acquisition de 100 Hz et enfin un rayon d'excitation de 1 cm. Des films thermographiques obtenus dans ce cadre, nous avons ensuite tirés l'évolution temporelle de la température au centre de la trace thermique. Un exemple de résultats obtenus est présenté sur la figure 4. Elle montre bien un comportement en pente  $-1/2$  pendant les 200 premières millisecondes de l'analyse, ce qui justifie les simplifications prises en compte précédemment.

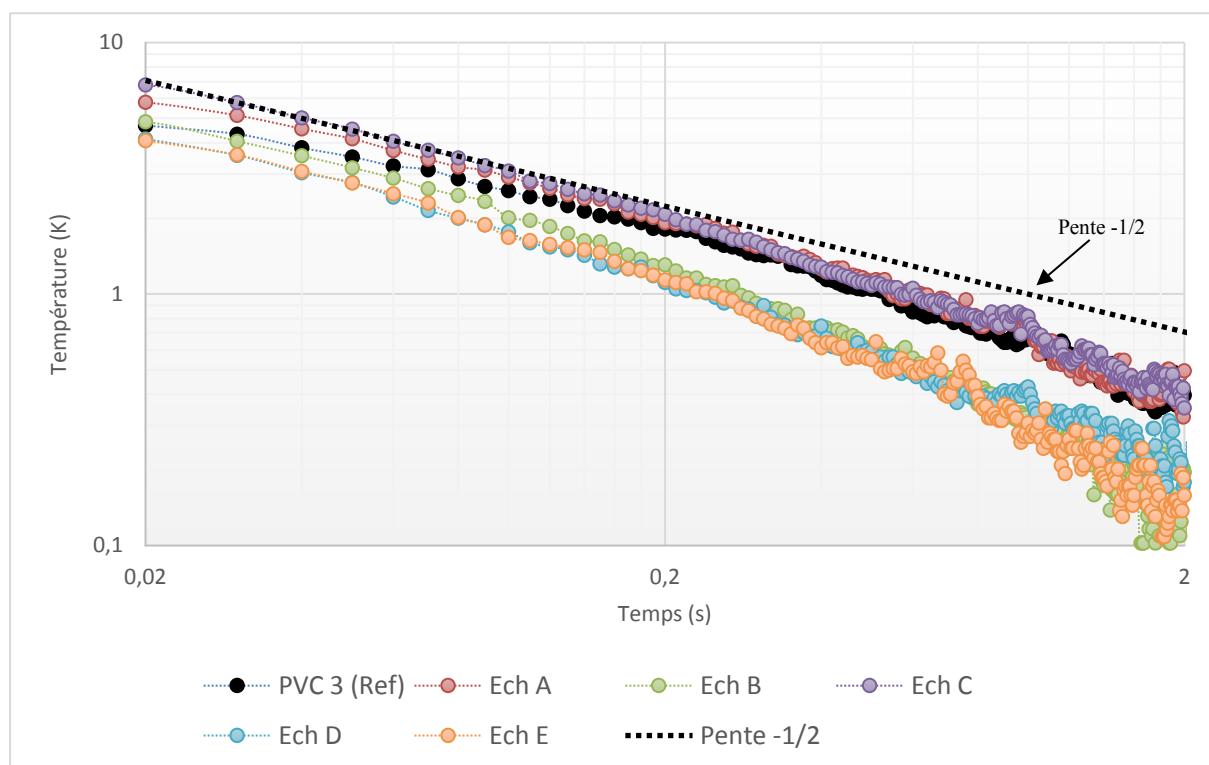


Figure 4 : Réponses en températures des échantillons (représentation Log-Log)

A partir de ces courbes et en mettant en œuvre la méthode des comparaisons, nous avons estimés les effusivités des échantillons A, B, C, D et E ; l'échantillon ref servant bien sûr de référence. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 2. Ils montrent que les valeurs estimées d'effusivité thermique sont proches des valeurs de références et donc la faisabilité de la méthode photothermique.

	<b>Ech A</b>	<b>Ech B</b>	<b>Ech C</b>	<b>Ech D</b>	<b>Ech E</b>
b estimé (J.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> .s <sup>-1/2</sup> )	343	466	334	543	563
Référence DICO (J.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> .s <sup>-1/2</sup> )	345	471	358	555	611
Écart relatif %	-0,5%	-1,0%	-6,8%	-2,1%	-7,9%

Tableau 2 : Les résultats expérimentaux obtenus

Les mesures obtenues présentent une bonne corrélation avec les mesures de référence attendues. Les écarts relatifs n'excèdent pas 12% ce qui est très encourageant.

## 5 Conclusion

Dans le cadre de l'aide à la conservation des œuvres d'art, les méthodes photothermiques sont d'un apport important pour la détection et la caractérisation de défauts structurels. Dans le cadre de la détection de pollution aux sels hygroscopiques, c'est l'étude de l'évolution locale de propriétés thermophysiques que nous proposons de mettre en œuvre. Toutefois, l'épaisseur des peintures murales et le besoin de mesures in-situ, nous ont conduits à l'introduction d'une estimation d'effusivité thermique longitudinale. Dans ce travail, nous avons d'abord présenté notre démarche d'investigation. Elle est basée sur l'étude de la diffusion latérale d'un spot de chaleur engendré par une impulsion laser. Nous avons ensuite développé une modélisation de cette démarche et montré que dans le cas des œuvres d'art, lents thermiquement, que la méthode des comparaisons utilisées classiquement en méthode flash étendue face avant est applicable dans notre cas d'étude. Dans une troisième étape, nous avons présenté le dispositif expérimental mis en œuvre pour l'étude. Enfin, à l'aide de 5 échantillons tests, caractérisés au préalable par le laboratoire certes, nous avons montré la faisabilité de la méthode proposée. Il y aurait maintenant à généraliser cette étude sur une panoplie plus importante d'échantillons. Il y aurait encore à étudier la reproductibilité et la robustesse de la méthode photothermique. Il y aurait enfin à étudier ses possibilités en matière de détection de pollution aux sels hygroscopiques d'œuvres d'art du patrimoine culturel. Des études allant dans ce sens sont en cours.

## 6 Bibliographie

- [1] Bodnar, J. L., Candoré, J. C., Nicolas, J. L., Szatanik, G., Detalle, V., & Vallet, J. M. (2012). Stimulated infrared thermography applied to help restoring mural paintings. *NDT & E International*, 49, 40-46.
- [2] Bodnar, J. L., Mouhoubi, K., Di Pallo, L., Detalle, V., Vallet, J. M., & Duvaut, T. (2013). Contribution to the improvement of heritage mural painting non-destructive testing by stimulated infrared thermography. *The European Physical Journal-Applied Physics*, 64(1).
- [3] Cernuschi, F., Russo, A., Lorenzoni, L., & Figari, A. (2001). In-plane thermal diffusivity evaluation by infrared thermography. *Review of scientific instruments*, 72(10), 3988-3995.
- [4] Krupa, I., Boudenne, A., & Ibos, L. (2007). Thermophysical properties of polyethylene filled with metal coated polyamide particles. *European Polymer Journal*, 43(6), 2443-2452.
- [5] Sobolciak, P., Karkri, M., Al-Maadeed, M. A., & Krupa, I. (2016). Thermal characterization of phase change materials based on linear low-density polyethylene, paraffin wax and expanded graphite. *Renewable Energy*, 88, 372-382.