

# Développement d'un émissomètre portable pour la caractérisation de structures de bâtiment et de chaussée

Jean-Pierre MONCHAU<sup>1\*</sup>, Laurent IBOS<sup>1</sup>, Yves CANDAU<sup>1</sup>, Vincent FEUILLET<sup>1</sup>, Mario MARCHETTI<sup>2</sup>, Jean DUMOULIN<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Centre d'Etudes et de Recherche en Thermique, Environnement et Systèmes EA3481  
Université Paris Est Créteil

61 Avenue du Général De Gaulle 94010 Créteil Cedex

<sup>2</sup> CETE de l'Est LRPC Nancy-ERA 31

71 Rue de la grande haie, 54510 Tomblaine

<sup>3</sup> LUNAM Université, IFSTTAR, MACS

44340 Bouguenais

\*(auteur correspondant : jean-pierre.monchau@u-pec.fr)

**Résumé** - Dans le cadre du diagnostic quantitatif des structures par des moyens de mesure infrarouge, la connaissance de l'émissivité est essentielle. L'article décrit un nouvel appareil capable d'effectuer des mesures d'émissivité sur des surfaces hétérogènes aussi bien en laboratoire que sur le terrain. Cet appareil récemment breveté permet des mesures en quelques secondes, dans plusieurs bandes spectrales. Les premières mesures sont ensuite présentées et analysées.

## 1. Introduction

Dans le cadre du diagnostic thermique des bâtiments et de la prévention du risque hivernal sur le réseau routier, la thermographie infrarouge est de plus en plus utilisée [1, 2]. Dans le but d'affiner les mesures, la connaissance de l'émissivité infrarouge à température ambiante est nécessaire. Cette émissivité doit être connue dans deux plages spectrales distinctes : sur la plage spectrale  $1 \mu\text{m}$  à plus de  $50 \mu\text{m}$  (soit 95% du rayonnement total) et dans la plage spectrale de  $8 \mu\text{m}$  à  $14 \mu\text{m}$  appelée bande III qui est la bande spectrale des caméras thermiques à microbolomètres. Pour les deux applications envisagées, un appareil portable de mesure de l'émissivité infrarouge, appelé émissomètre, doit pouvoir être utilisé sur le terrain. Pour cela, plusieurs dispositifs ont été développés au CERTES. Le dernier dénommé EM2 a été développé récemment et a été breveté (FR-1251476). Sa description fait l'objet de cet article. Ce nouveau dispositif, aisément transportable sur le terrain, utilise une nouvelle méthode de mesure rapide, permettant d'étudier un nombre important d'échantillons.

Dans un premier temps, nous présenterons les différentes méthodes existantes de mesure de l'émissivité et les raisons de notre choix pour le développement du nouvel appareil. Nous décrirons son fonctionnement et nous présenterons les premières mesures effectuées.

## 2. Méthode de mesure de l'émissivité

Cette partie a pour objet de classer les méthodes de mesures suivant le principe physique utilisé : méthodes calorimétriques d'une part et méthodes radiométriques (directe et indirecte) d'autre part. Plusieurs publications donnent un aperçu complet sur l'ensemble des méthodes de mesure de l'émissivité : [3, 4].

## 2.1. Méthodes calorimétriques

L'échantillon est maintenu à la température à laquelle on souhaite connaître l'émissivité et placé dans une enceinte sous vide et à très basse température. On mesure au cours de l'expérimentation la dépense énergétique pour maintenir l'échantillon à température constante. Plusieurs dispositifs sont décrits dans les références suivantes : [5, 6]. La méthode calorimétrique a aussi été adaptée à des configurations spécifiques [7]. Cette méthode est celle qui permet de mesurer l'émissivité totale hémisphérique. Elle est cependant très lourde à mettre en oeuvre.

## 2.2. Méthodes radiométriques directes

On classe sous cette appellation les méthodes consistant à mesurer le rayonnement émis par la surface de l'échantillon. Cela peut être effectué par un spectrophotomètre à transformée de Fourier, ou un détecteur muni ou non de filtres sélectifs ou d'un monochromateur [8, 9]. Pour effectuer la mesure, il faut se protéger du rayonnement ambiant. Pour cela deux méthodes sont fréquemment employées ; soit en plaçant l'échantillon sous vide dans un cryostat, soit en modulant la température de surface de l'échantillon autour de la température de mesure [10]. De cette manière, on pourra ainsi séparer le flux propre de l'échantillon de celui qui est réfléchi par ce même échantillon. A température élevée, le cryostat n'est plus nécessaire et on préfère comparer la surface à étudier à un corps noir porté à la même température que l'échantillon [11].

## 2.3. Méthodes radiométriques indirectes

Ces méthodes utilisent la loi de Kirchhoff qui relie, pour un matériau opaque, l'émissivité  $\epsilon$  à l'absorption. Cela permet de relier le coefficient de réflexion  $\rho$  à l'émissivité :  $\epsilon + \rho = 1$ . Cette méthode peut sembler plus simple que les précédentes à mettre en oeuvre, mais nécessite certaines précautions pour effectuer la mesure. En effet, il faut mesurer le coefficient de réflexion hémisphérique directionnel, ou directionnel hémisphérique, et cela avec une source possédant la même répartition spectrale qu'un corps noir à la température à laquelle on souhaite connaître l'émissivité. Le problème de la répartition spectrale de la source peut être résolu en utilisant une source à cette température (on se place donc strictement dans le cadre de la loi de Kirchhoff) . Il faut donc à température ambiante être capable de différencier la réflexion de cette source sur l'échantillon, du rayonnement électromagnétique ambiant. Pour ce faire, le plus simple est de moduler la source. Plusieurs solutions sont utilisables, par exemple une cavité modulée, ce qui a été effectué au CERTES depuis plus de 10 ans [2]. On peut aussi envoyer sélectivement toutes les incidences utiles pour obtenir en outre une indicatrice d'émissivité [12]. Une autre solution est de mesurer la réflectivité directionnelle hémisphérique en éclairant l'échantillon avec une seule direction proche de la normale, et en mesurant la totalité de la réflexion. Cela peut se faire grâce à une sphère intégrante [13].

## 3. Le nouvel appareil développé au CERTES

Sur le premier émissomètre développé au CERTES [2], la modulation du flux infrarouge s'effectue en modulant la température. L'inertie thermique du dispositif impose une fréquence de modulation lente (25 mHz) et une durée de mesure de 16 mn. Par ailleurs, une mauvaise prise en compte de la réflexion spéculaire pour les matériaux métalliques polis conduit à un biais sur les mesures sur ces matériaux. Pour éviter cela, il a été décidé de développer une autre méthode de mesure en modulant une source hémisphérique à une fréquence plus élevée. En outre, nous avons choisi une conception qui permet d'effectuer des mesures sur le terrain plus aisément

qu'auparavant. Ce nouvel appareil utilise comme principe de mesure une méthode indirecte, c'est-à-dire que l'on mesure le coefficient de réflexion hémisphérique directionnel, et on en déduit l'émissivité. Ce nouveau dispositif est actuellement protégé par un brevet (FR-1251476).

### 3.1. Principe

Nous avons choisi une autre méthode de modulation en utilisant un écran mobile occultant une source à température fixe. La plupart des dispositifs commerciaux existant sont des écrans circulaires rotatifs n'occultant qu'une seule incidence. Il faut donc réaliser un écran tridimensionnel hémisphérique occultant une source elle-même hémisphérique. En outre, pour mesurer le flux incident, on peut soit mesurer la température de la source, soit directement mesurer le flux infrarouge émis par celle-ci. En résumé il faut donc une source infrarouge portée à une température proche de la température à laquelle on souhaite connaître l'émissivité, un écran capable de moduler celle-ci et un système de mesure du flux infrarouge incident et réfléchi adapté aux incidences à mesurer.

### 3.2. Description

L'échantillon A est placé sous l'appareil comme on peut le voir sur la Figure 1. La source infrarouge hémisphérique B est un cylindre en aluminium fermé par le haut par une plaque N, chauffé légèrement au dessus de la température ambiante. Deux écrans C et D modulent le flux émis par B. D est un écran fixe et C un écran mobile. Ces deux écrans possèdent deux séries de trous : une série de six trous autour du cylindre, et une série de trois trous au sommet de celui-ci. De cette manière, le flux infrarouge impliqué dans la réflexion spéculaire proche de la normale est modulé à une fréquence différente de celui impliqué dans la réflexion diffuse. Cela permet de différencier la réflexion spéculaire proche de la normale de la réflexion diffuse. Le cylindre B n'est pas thermostaté, et seuls les échanges thermiques naturels induisent un gradient de température entre la source et les écrans occultants. Un détecteur infrarouge E mesure le flux réfléchi, et un autre, noté F, tourné vers la source modulée, mesure le flux émis. De cette manière, il n'est pas nécessaire de connaître la température de la source, qui peut varier légèrement au cours de la mesure. Sur la Figure 3 représentant la tête de mesure, on peut constater que l'on a remplacé le détecteur E par deux détecteurs. E1 mesure la réflexion dans une bande large de  $1 \mu\text{m}$  à  $50 \mu\text{m}$  et E2 mesure la réflexion dans la bande spectrale de  $8 \mu\text{m}$  à  $14 \mu\text{m}$  appelée bande III. Pour la bande III, le détecteur possède une réponse suffisamment plate (réponse spectrale variant de 90% à 83% entraînant des erreurs négligeables sur  $\varepsilon$ ). Les critères de choix pour les détecteurs ont été le prix et la facilité d'utilisation (pas de refroidissement). Deux possibilités se présentaient : les détecteurs pyro-électriques ou les thermopiles. Ces dernières sont plus stables en gain et présentent un plus faible bruit. Les thermopiles utilisées sont de la marque Dexter Research Center Inc. Les éléments G,Q,C sont solidaires, maintenus par un roulement à billes H et mis en rotation grâce à un moteur pas-à-pas K, relié mécaniquement par un système de galets I et J (Figure 2). L'axe G est creux, ce qui permet de laisser passer un tube M dans lequel passent les câbles de mesure. Ce tube M est maintenu par une potence L. La Figure 5 montre l'appareil avec son boîtier électronique en position basse. Celui-ci comporte l'électronique de conditionnement ainsi qu'une batterie permettant son utilisation autonome, un chargeur et un boîtier d'acquisition USB National Instruments©. Sur la Figure 4 on peut observer un exemple de mesure sur le terrain.

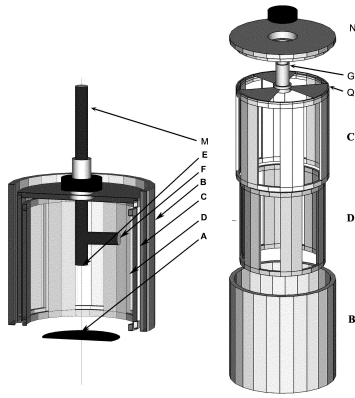


Figure 1 *Schema de l'émissomètre*

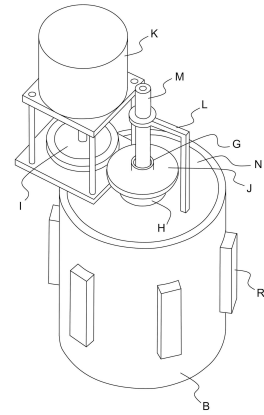


Figure 2 *Vue d'ensemble de l'émissomètre*

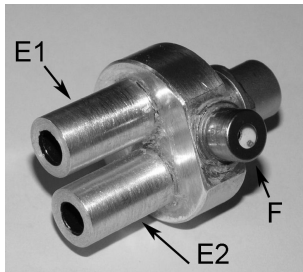


Figure 3 *Tête de mesure*

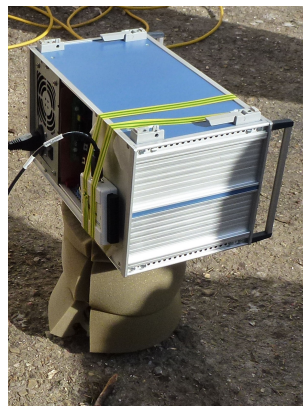


Figure 4 *Mesure in-situ de l'émissivité d'un revêtement de sol*

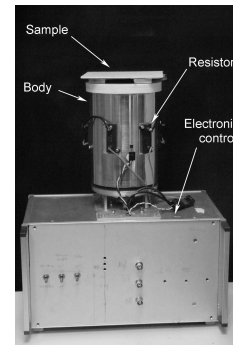


Figure 5 *Emissomètre EM2*

### 3.3. Traitement du signal

#### 3.3.1. Traitement analogique du signal

Le signal fourni par les thermopiles est faible et nécessite une première amplification par 1000. Ce gain amplifie aussi la partie continue du signal fourni par la thermopile. Un premier filtre passe-haut élimine cette composante du signal. Après une seconde amplification réglable, un filtre passe-bas évite le repliement de spectre avant la numérisation. La bande passante de l'ensemble est comprise entre 3 Hz et 15 Hz. Le synoptique de cette chaîne de traitement est présenté Figure 6.

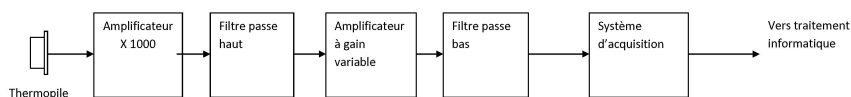


Figure 6 *Traitement analogique du signal*

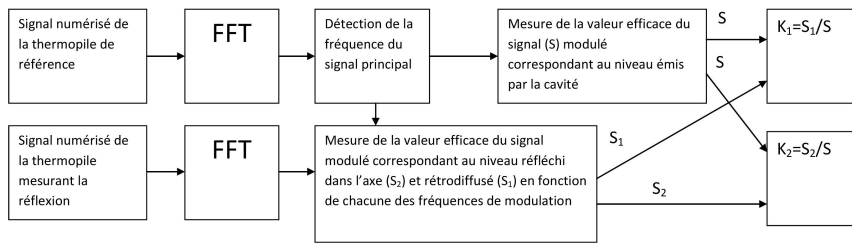


Figure 7 Traitement numérique du signal

### 3.3.2. Traitement numérique du signal

Le traitement numérique est effectué sous LabView©. Par transformée de Fourier rapide (notée FFT) sont extraites la fréquence du signal émis par les parois de la thermopile F ainsi que sa valeur efficace, proportionnelle au flux incident. Grâce à la connaissance de la fréquence de modulation, la mesure des flux réfléchis (spéculaire et diffus) est extraite pour les deux thermopiles. Le synoptique du traitement pour une des bandes spectrales est présenté Figure 7. Le rapport entre le flux réfléchi  $S_1$  pour la réflexion diffuse et le flux émis  $S$  est noté  $K_1$ . Le rapport entre le flux réfléchi  $S_2$  pour la réflexion spéculaire et le flux émis  $S$  est noté  $K_2$ .

### 3.3.3. Exemples de signaux obtenus

La Figure 8 montre un exemple de signal. La fréquence de rotation du cylindre rotatif est de 1.5 Hz. Les parois ayant six orifices, et le sommet trois, les fréquences de modulation des flux infrarouges sont de 4.5 Hz et 9 Hz. Sur la FFT du signal (Figure 9), on peut observer les pics correspondants aux flux incident et réfléchi de manière diffuse (9 Hz) et spéculaire (4.5 Hz).

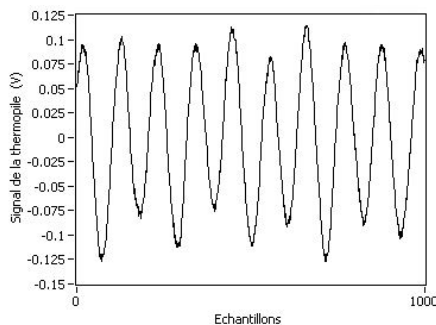


Figure 8 Exemple de signal temporel mesuré

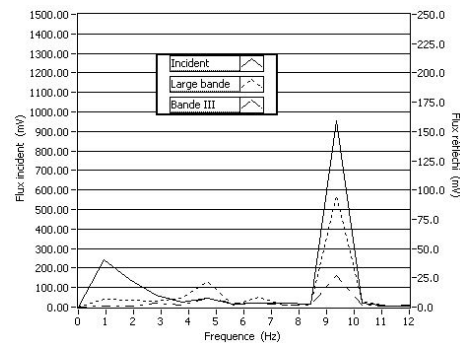


Figure 9 Exemple de représentation fréquentielle des signaux mesurés

## 3.4. Extraction des propriétés radiatives à partir des mesures de réflexions

### 3.4.1. Calcul de l'émissivité

Pour avoir la valeur de la réflectance permettant d'obtenir l'émissivité, on utilise les valeurs  $K_1$  et  $K_2$ . L'appareil est calibré grâce à une fonction linéaire donnant  $K$ , proportionnel au coefficient de réflexion :  $K = f(K_1, K_2) = K_1 + a \times K_2$ . On détermine cette fonction  $f$  en mesurant la réflectance de deux échantillons connus. Cette calibration est réalisée une seule fois. Un étalonnage est effectué à chaque nouvelle campagne de mesures. Pour cela, on utilise

Echantillon	$\epsilon$ Large bande	Incertitude	$\epsilon$ bande III	Incertitude
Nextel	0.976	0.006	0.977	0.005
Alumine	0.742	0.017	0.775	0.015
654-4B-MELUN	0.960	0.012	0.962	0.008
651-1B-MELUN	0.958	0.010	0.953	0.009
Route de référence	0.945	0.008	0.934	0.010
892-1	0.939	0.011	0.927	0.011
891-10	0.963	0.008	0.959	0.008
840-24-19	0.948	0.008	0.948	0.009
807-7C	0.957	0.008	0.960	0.011
804-4C	0.960	0.007	0.960	0.008

Tableau 1 Mesures d'émissivité d'échantillons de route en large bande et bande-III

une référence de réflectance en aluminium rugeux pour l'étalonnage. On appelle  $K_{Al}$  la valeur mesurée avec cet étalon de réflectance :  $\rho_{Al}$ . On mesure ensuite pour un échantillon inconnu la valeur de  $K$ , et l'on en déduit  $\rho$  pour celui-ci :

$$\rho = \rho_{Al} \times \frac{K}{K_{Al}} = \rho_{Al} \times \frac{f(K_1, K_2)}{f(K_{1Al}, K_{2Al})} \quad (1)$$

où  $\rho_{Al} = 0.937$ . L'émissivité obtenue est l'émissivité à la température  $T$  de la source B. Cette valeur d'émissivité ne peut être utilisée à d'autres températures que si le corps est gris ou si les variations de température sont faibles.

### 3.4.2. Calcul des incertitudes

Le calcul des incertitudes a été effectué conformément aux documents du BIPM [14]. Après simplification, le calcul d'incertitude est donné par l'équation 2 :

$$u(\rho) = \rho \times \sqrt{\left(\frac{u(K)}{K}\right)^2 + \left(\frac{u(K_{Al})}{K_{Al}}\right)^2 + \left(\frac{u(\rho_{Al})}{\rho_{Al}}\right)^2} \quad (2)$$

où  $u(K)$  et  $u(K_{Al})$  sont donnés par :

$$u(K) = \sqrt{u(K_1)^2 + a^2 \times u(K_2)^2} \text{ et } u(K_{Al}) = \sqrt{u(K_{1Al})^2 + a^2 \times u(K_{2Al})^2}$$

Les valeurs des incertitude-type  $u(K_i)$  des valeurs  $K_i$  sont données par la mesure de l'écart-type sur 10 mesures répétées.

Puisque  $\epsilon = 1 - \rho$ , l'incertitude sur l'émissivité est la même que celle sur la réflectance.

### 3.4.3. Evaluation du caractère spéculaire de l'échantillon

L'appareil n'ayant pas de système de focalisation, un échantillon purement spéculaire donnera une réponse aussi bien pour  $K_1$  que pour  $K_2$  alors que seul  $K_2$  devrait être non nul. Pour remonter à une indicatrice, il faut calibrer l'appareil avec des échantillons ayant des indicatrices d'émissivité connues. On en déduit un pourcentage de réflexion spéculaire et de réflexion diffuse, très utile en thermographie infrarouge pour se prémunir des artefacts dus à une réflexion

spéculaire. Cette échelle en pourcentage va de 0% pour un matériau purement diffusant (lambertien) à 100% pour un miroir plan en aluminium. On calibre l'appareil et on détermine les deux fonctions  $diff = g(K_1, K_2)$  et  $spec = h(K_1, K_2)$ , où  $spec$  et  $diff$  sont les pourcentages du flux réfléchi de manières spéculaire et diffuse. Le tableau 2 donne ces pourcentages pour divers matériaux.

Matériau (reflectance)	$K_1$	$K_2$	% spec	% diff
Miroir Al (0.98)	0.0250	0.1203	100	0
Al rugueux (0.94)	0.0819	0.0303	9.3	90.7
Alumine (0.26)	0.0229	0.0245	44.9	55.1
Papier alu brillant (0.98)	0.0322	0.1057	88.1	11.9
Papier alu mat (0.98)	0.0775	0.0337	13.7	86.3
Nextel velvet (0.03)	0.0055	0.0020	9.3	90.7
carton (0.15)	0.0104	0.0046	14.3	85.7

Tableau 2 *Pourcentage de répartition entre les réflexions diffuse et spéculaire*

## 4. Premières mesures effectuées avec le nouvel appareil

### 4.1. Mesures sur des échantillons de route

Dans le cadre de l'opération de recherche de l'IFSTTAR, PALM (Prévisions et ALertes en situations Météo-routières dégradées), nous avons effectué une campagne de mesures sur près de 200 échantillons de routes stockés au laboratoire du CETE de Clermont-Ferrand. Ces échantillons ont été prélevés sous forme de carottes sur une période de plusieurs années sur l'ensemble du territoire français, et conservés en atmosphère contrôlée. Le tableau 1 montre un aperçu de quelques mesures effectuées.

	Matériau	Large bande		Bande III	
		Emissivité	Incertitude	Emissivité	Incertitude
Mesure de calibration	Al rugueux	0.071	0.041	0.063	0.041
	Peinture Nextel	0.971	0.008	0.972	0.003
	Alumine	0.737	0.028	0.765	0.012
Surfaces intérieures	Toit	0.944	0.009	0.922	0.019
	Mur (peinture)	0.935	0.011	0.957	0.004
	Sol	0.947	0.014	0.967	0.005
Surfaces extérieures	sol	0.953	0.011	0.950	0.005
	Façade 1 (peinture)	0.945	0.014	0.944	0.007
	Sol	0.926	0.014	0.920	0.008
	Façade 2 (peinture)	0.958	0.012	0.958	0.005

Tableau 3 *Exemple de mesures sur des surfaces de bâtiment*

## 4.2. Mesure in-situ sur un bâtiment étudié

Dans le cadre du projet DPE-IITI financé par l'ADEME, des mesures quantitatives par thermographie infrarouge sont effectuées sur des bâtiments publics de la ville de Noisiel (77) en vue d'évaluer la résistance thermique de différents parois de bâtiments. La connaissance de l'émissivité était nécessaire, nous avons effectué des mesures sur les différents parois d'un groupe scolaire, objet de notre étude. Le tableau 3 récapitule ces mesures.

## 5. Conclusion

Le but du développement de cet appareil était de réduire considérablement les durées de mesure. Il est maintenant possible de caractériser une centaine d'échantillons en une journée de travail. L'appareil pèse 4 kg et peut être utilisé sur le terrain, soit en le branchant sur le secteur, soit en le faisant fonctionner sur sa batterie. On peut donc effectuer aisément des mesures sur site, la durée de mesure étant de quelques secondes. Les possibilités d'évolution de l'appareil pour des situations particulières sont nombreuses grâce à la simplicité du dispositif. Il est, par exemple, envisagé d'embarquer l'appareil sur un véhicule pour effectuer des mesures en roulant.

## Références

- [1] S. Datcu, L. Ibos, Y. Candau, S. Matteï, *Improvement of building wall surface temperature measurements by infrared thermography*, Infrared Phys. Technol., 451 (2005).
- [2] L. Ibos, M. Marchetti, A. Boudenne, S. Datcu, J. Livet, Y. Candau, *Infrared emissivity measurement device : Principle and applications*, Meas. Sc. Tech., 2950 (2006).
- [3] L. Kauder, *Spacecraft Thermal Control Coatings References*, NASA-TP-2005-212792, NASA-Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland
- [4] J.F. Sacadura, *Measurement techniques for thermal radiation properties*, Proceedings of The Ninth International Heat Transfer Conference, Jerusalem, Israel P 207-222 (1990)
- [5] J. Hameury, B. Hay, J. R. Filtz, *Measurement of Total Hemispherical Emissivity Using a Calorimetric Technique*, Int. J. Thermophys, 1607 (2007)
- [6] C. Fabron, A. Meurat, *Measurement of total hemispheric emissivity at low temperature*, International Symposium on Environmental Testing for Space Program, Liège, Belgium (2001)
- [7] H. Tanaka, S. Sawai, K. Morimoto, K. Hisano, *Evaluation of hemispherical total emissivity for thermal radiation calorimetry*, Int. J. Thermophys, 927 (2000)
- [8] A. Mazikowski, K. Chrzanowski, *Non-contact multiband method for emissivity measurement*, Infrared Phys. Technol., 91 (2003)
- [9] V. V. Vitkovskii, V. G. Gorshenev, Y. F. Potapov, *Measurement of Spectral Directional Emissivity of Materials and Coatings in the Infrared Region of Spectrum*, Thermal Engineer 2009, Vol. 56 (3), 245-248
- [10] D. Especel, S. Matteï, *Total Emissivity Measurement Without Use of an Absolute Reference*, Infrared Physics & Technology, vol. 37, 777-784 (2003)
- [11] L. Del Campo, R.B. Perez-Saez, X. Esquisabel, I. Fernandez, M.J. Tello, *New experimental device for infrared spectral directional emissivity measurements in a controlled environment*, Review Of Scientific Instruments, vol. 77, 113111, 1-8 (2006)
- [12] J. Hameury, B. Hay, J.R. Filtz, *Measurement of Infrared Spectral Directional Hemispherical Reflectance and Emissivity at BNM-LNE*, International Journal of Thermophysics, Vol. 26, No. 6, November 2005
- [13] L.M. Hanssen, S. Kaplan, *Infrared diffuse reflectance instrumentation and standards at NIST*, Anal. Chim. Acta, 289 (1999)
- [14] *Evaluation of measurement data - guide to the expression of uncertainty in measurement, JCGM 100 :2008*, © JCGM 2008, First edition September 2008, BIPM