

Analyse du comportement radiatif de matériaux de l'infrastructure routière. Principes et mesures de l'émissivité infrarouge

Mario MARCHETTI ^{1*}, Laurent IBOS ²,
Abdel BOUDENNE ², Stefan DATCU ²,
Yves CANDAU ², Jean DUMOULIN ³,
Jean LIVET ¹

¹LRPC de Nancy, CETE de l'Est
Équipe de recherche associée au LCPC n°31
Exploitation de la route en conditions
météorologiques dégradées

²CERTES, Université Paris XII Val-de-Marne,
Créteil, France

³LCPC-SMI-TI, Centre de Nantes, France

■ RÉSUMÉ

L'émissivité infrarouge est un paramètre nécessaire pour les modèles numériques de prévision de la température ainsi que de l'état de surface quelle que soit la situation météorologique. Ce travail présente le développement d'un nouveau dispositif de mesure de l'émissivité infrarouge de surface par une méthode indirecte. La surface est soumise à un rayonnement infrarouge isotrope et modulé. L'intensité du rayonnement qu'elle réfléchit dans une direction donnée est mesurée à l'aide d'un détecteur de type thermopile. Celui-ci opère dans la bande spectrale 1-40 μm . Cette large bande spectrale conduit à la mesure de l'émissivité directionnelle totale, définie en tant qu'émissivité. Les effets de la fréquence de la modulation de température, de la composition de surface ainsi que de la rugosité ont été étudiés. Les résultats indiquent la bonne capacité du dispositif à déterminer des émissivités infrarouges à la température des surfaces analysées. Des mesures sur des matériaux de l'infrastructure routière sont également présentées.

Analysis of the radiative behavior of road materials Principles and measurements of infrared emissivity

■ ABSTRACT

Infrared emissivity is a critical parameter for numerical models designed to predict surface temperature as well as road surface conditions, regardless of the meteorological context. This article will describe the development of a new device for indirect measurement of infrared surface emissivity. The surface is exposed to an isotropic, modulated infrared radiation. The intensity of radiation reflected by the surface in a given direction is then measured with a thermopile-type detector operating within the 1-40 μm spectral band. This wide spectral band yields the total directional emissivity measurement, defined as emissivity. The effects of temperature modulation frequency, surface composition and roughness have all been studied. Results reveal an adequate device capacity in determining infrared emissivities for the surface temperatures targeted by this analysis. The measurements conducted on some road infrastructure materials will also be presented.

* AUTEUR À CONTACTER :

Mario MARCHETTI

mario.marchetti@developpement-durable.gouv.fr

INTRODUCTION

La route de demain devra être capable de nous dire ce qu'elle est, et ce par tout temps [1]. Le projet TOTEM (Conduite par Tout TEMps) de l'opération « Outils pour l'exploitation de la route » vise à travailler sur l'identification et la caractérisation des propriétés physiques de la route, susceptibles de contribuer à l'élaboration de cette information. Les premières investigations portent sur la vision infrarouge embarquée et dans des conditions météorologiques perturbées.

La connaissance de l'émissivité infrarouge des surfaces routières est nécessaire à la compréhension des phénomènes météorologiques se développant en surface de chaussée. Elle est donc importante pour les travaux de modélisation des échanges thermiques entre la chaussée et l'atmosphère

en vue de la prévision de l'état de surface et des températures de surface. En effet, des travaux de modélisation ont montré l'importance de l'émissivité sur la température de surface. Le fait de passer d'une émissivité de 0,92 à 0,98 entraîne une modification de la température de surface de 1,3°C environ, ce qui a des répercussions sur la viabilité hivernale [2] d'après le modèle CESAR/GELS. Cette connaissance est également importante dans les techniques de thermographie infrarouge car l'émissivité permet de passer d'une mesure de température de brillance à celle de la température de surface. Cette connaissance ne repose aujourd'hui que sur des données de la littérature. L'objectif des travaux entrepris était d'élaborer un dispositif capable de mesurer l'émissivité hémisphérique d'un matériau à température ambiante. Une rapide revue bibliographique sera présentée. Dans une première partie, les caractéristiques du dispositif et les conditions de mesure de l'émissivité par méthode indirecte seront décrites. Une seconde partie détaillera les facteurs d'influence de l'émissivité de matériaux, puis des mesures sur des matériaux de l'infrastructure routière.

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES TECHNIQUES DE DÉTERMINATION DE L'ÉMISSIVITÉ

Par définition, on appelle émissivité d'un corps réel, le rapport entre l'émission de ce corps réel et celle du corps idéal appelé corps noir porté à la même température.

L'émissivité est dite monochromatique si elle correspond à une seule longueur d'onde et totale si elle concerne tout le spectre.

On parle aussi d'émissivité directionnelle quand elle correspond à une direction donnée et d'émissivité hémisphérique dans le cas où l'on considère toutes les directions d'émission dans le demi-espace qui surplombe la surface du matériau [3].

L'émissivité est mesurée par une méthode directe ou indirecte [4, 5]. Pour cette dernière, la mesure effectuée est celle de la réflectivité. L'émissivité est alors déduite en s'appuyant sur la loi de Kirchhoff pour des conditions données de mesures :

- l'émissivité de la source ne dépend pas de la longueur d'onde émise, elle est constante sur tout le spectre,
- la source et le matériau dont l'émissivité est recherchée sont à la même température.

Dans ces conditions, il est alors possible d'écrire : $\varepsilon = 1 - \rho^{\circ}$, avec ρ° la réflectivité hémisphérique directionnelle, qui correspond à la fraction du flux total incident provenant de toutes les directions de l'hémisphère isotrope et qui est réfléchi dans une direction donnée

La méthode directe s'appuie soit sur une technique calorimétrique [4-7], soit sur une technique radiométrique avec un corps noir de référence [8]. Pour réduire les effets des radiations émises par le milieu ambiant et le « bruit », une modulation a été mise en place avec un système mécanique [9, 10], ou bien par modulation du signal émis [6, 11, 12].

La méthode indirecte s'appuie sur la loi de Kirchhoff. La réflectivité est mesurée et l'émissivité est alors déduite, comme expliqué précédemment. Un spectromètre peut être utilisé pour accéder à l'émissivité monochromatique directionnelle [4, 10], ou bien avec une sphère intégrante [13]. D'autres dispositifs commerciaux ou prototypes sont disponibles. Tous utilisent un détecteur (thermopile, bolomètre, ...) collectant le flux infrarouge réfléchi par le matériau à une température donnée [14-16]. Une autre technique a été développée avec un radiomètre multispectral [17]. Il existe plusieurs algorithmes pour extraire l'émissivité des mesures [18-20]. De tels radiomètres, comme celui développé par la société CIMEL, ont été utilisés pour la détermination de l'émissivité [21-24]. L'utilisation d'une caméra thermique est décrite par Gaussorgues [25].

La détermination de l'émissivité peut également être conduite avec une caméra thermique, comme indiqué par Madding [26, 27]. Dans certains cas, cela peut conduire à des écarts de 0,2

dans la valeur de l'émissivité. Une autre technique infrarouge a été considérée pour accéder à l'émissivité d'une chaussée à l'aide d'une modulation de fréquence [28] et s'affranchir des variations de l'émissivité. Une technique équivalente a été employée par Holzwarth pour la mesure de l'épaisseur d'eau [29].

DESCRIPTION DE L'APPAREIL DE MESURE DE L'ÉMISSIVITÉ DU LRPC DE NANCY

■ Principe de mesure de l'émissivité

D'après la loi de Kirchhoff, l'émissivité directionnelle d'un corps opaque soumis à un rayonnement isotrope incident s'écrit :

$$\varepsilon(\theta) = 1 - \rho(\theta) \quad (1)$$

$\varepsilon(\theta)$ et $\rho(\theta)$ sont respectivement l'émissivité et la réflectivité directionnelle. La réflectivité dépend de la gamme spectrale du rayonnement incident. Aussi la source du rayonnement doit-elle être à une température proche de celle du corps analysé.

Le dispositif expérimental développé en collaboration avec le CERTES réalise les mesures à température ambiante par méthode indirecte. Il mesure le rayonnement infrarouge réfléchi par la surface de l'objet à caractériser, soumise à un flux thermique modulé et contrôlé [6, 7]. Vu son large spectre, il permet de mesurer l'émissivité directionnelle totale appelée ici émissivité.

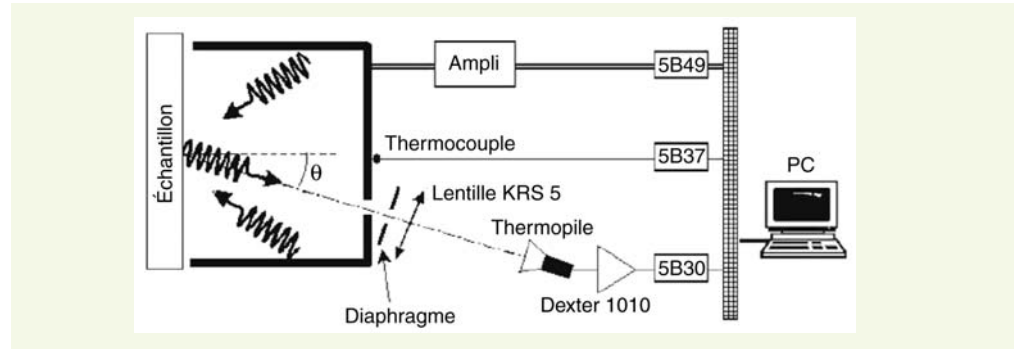
■ Description du dispositif de mesure de l'émissivité

L'émissomètre est composé de quatre éléments principaux (Figure 1) :

- la source infrarouge (hémisphérique et isotrope), formée d'un cube métallique en alliage d'aluminium. Sa température est contrôlée par les éléments Peltier accolés à la surface externe du cube. La température de la source est mesurée à l'aide d'un thermocouple de type K inséré dans la face supérieure du cube, dont le signal est conditionné par un module Analog Device 5B37. L'intérieur est recouvert d'une peinture Nextel Velvet coating 811-21 très émissive.
- un détecteur de type thermopile sensible au rayonnement infrarouge, de chez Dexter Research™, modèle 1M, dont la sensibilité en tension moyenne est $s=18,9 \text{ V}\cdot\text{W}^{-1}$. Son signal est alors amplifié avec un amplificateur faible bruit Dexter™ 1010, et conditionné avec un module Analog Device™ 5B30.
- un dispositif optique de mesure du flux réfléchi constitué d'un diaphragme à iris et d'une lentille transparente au rayonnement infrarouge en KRS5, de diamètre et de focale égaux à 38 mm. Le KRS5 est transparent au rayonnement infrarouge sur la plage 0,5-40 μm et est constitué de TlBr-TlI. La lentille permet de focaliser le flux infrarouge réfléchi sur le détecteur. Le flux infrarouge passe par un orifice de 10 mm de diamètre au niveau de la face supérieure de la source infrarouge.
- une chaîne de contrôle et d'acquisition des données pilotée par ordinateur à l'aide d'un programme développé avec le logiciel LabVIEW™.

L'ordinateur génère un signal sinusoïdal conditionné par un module Analog Device™ 5B49, puis amplifié à l'aide d'un amplificateur de puissance. Ce signal alimente des modules à effet Peltier branchés à la fois en série et en parallèle. La température de la source est donc modulée à une fréquence connue. La portion de flux réfléchi par l'échantillon est proportionnelle à la réflectivité ρ de celui-ci. Le dispositif optique (lentille, diaphragme) et le détecteur (thermopile) permettent de mesurer le flux réfléchi dans une direction précise. Il améliore la directivité de la thermopile afin d'avoir un angle solide de mesure assez faible pour tendre le plus possible vers une mesure de réflectivité hémisphérique directionnelle, la direction possédant un angle de 15° par rapport à la normale.

Figure 1
Schéma simplifié de
l'émissomètre portable



■ Calcul de l'émissivité infrarouge

Un étalonnage est conduit avec un matériau d'émissivité connue $\varepsilon_{\text{réf}}$. Soient $\tilde{U}_{\text{réf}}$ et $\tilde{\Phi}_s$ la tension de la thermopile et le flux reçu à la fréquence de modulation. Il vient alors :

$$\tilde{U}_{\text{réf}} = C \cdot (1 - \varepsilon_{\text{réf}}) \cdot \tilde{\Phi}_s = C \cdot (1 - \varepsilon_{\text{réf}}) \cdot \sigma \cdot \tilde{T}_s^4 \quad (2)$$

On dispose donc de la température de la source $T_s(t)$ et d'une tension $U(t)$ proportionnelle au flux reçu par la thermopile. C est une constante prenant en compte l'émissivité du corps étalon ainsi que la sensibilité de la thermopile, le facteur d'amplification, le facteur de forme et le coefficient de transmission. σ est la constante de Stefan-Boltzmann.

La mesure est alors conduite sur le matériau souhaité d'émissivité inconnue dans les mêmes conditions expérimentales. On obtient alors :

$$\rho = K \cdot \frac{\tilde{U}_m}{\tilde{T}_s^4} \quad (3)$$

Les signaux temporels $T_s(t)$ et $U(t)$ sont filtrés afin d'éliminer le bruit haute fréquence. La phase est ensuite fixée pour obtenir un nombre entier de périodes. En passant dans le domaine fréquentiel par calcul de la transformée de Fourier, l'amplitude du signal \tilde{U}_m et la température à la puissance quatrième \tilde{T}_s^4 à la fréquence de modulation sont extraites.

T_s^4 est de l'ordre de $8 \cdot 10^9 \text{ K}^4$ aux alentours de 300 K. Aussi prendre la transformée de Fourier de T_s^4 peut entraîner des imprécisions conséquentes. L'amplitude T_s^4 est alors écrite de la manière suivante :

$$\tilde{T}_s^4 = T_{\text{max}}^4 - T_{\text{min}}^4 = \left(T_{\text{moy}} + \frac{\Delta T}{2} \right)^4 - \left(T_{\text{moy}} - \frac{\Delta T}{2} \right)^4 \quad (4)$$

$$\tilde{T}_s^4 = 8 T_{\text{moy}} \cdot \frac{\Delta T}{2} \cdot \left(T_{\text{moy}}^2 + \left(\frac{\Delta T}{2} \right)^2 \right) \quad (5)$$

T_{moy} et ΔT sont respectivement la température moyenne et l'écart de température au cours de la mesure pour la fréquence choisie.

À partir des grandeurs ainsi obtenues, la réflectivité hémisphérique directionnelle est calculée et permet d'accéder à l'émissivité infrarouge grâce à la loi de Kirchhoff :

$$\varepsilon = 1 - K \cdot \frac{\tilde{U}_m}{\tilde{T}_s^4} \quad (6)$$

où K est un coefficient de proportionnalité obtenu par étalonnage à l'aide d'un échantillon d'émissivité connue utilisé comme étalon.

RÉSULTATS DE MESURES D'ÉMISSIVITÉ SUR DES MATÉRIAUX DE L'INFRASTRUCTURE ROUTIÈRE

■ Influence de la fréquence de modulation de la température

L'influence de la fréquence de la modulation de température a été évaluée à l'aide d'une plaque d'alumine de $15 \times 15 \text{ cm}^2$. Quatre fréquences de modulation ont été considérées, et cinq mesures d'émissivité entreprises à chaque fréquence. L'amplitude thermique et l'émissivité moyenne ainsi mesurées sont reportées dans le tableau. Pour chaque mesure, un étalonnage a été effectué avec une feuille d'aluminium dont l'émissivité est prise égale à $\epsilon_{\text{réf}}=0,063$. La face réfléchissante de ce matériau présente un aspect martelé lui conférant de la rugosité. Une vérification a également été entreprise avec une peinture noire Nextel Velvet coating d'émissivité constante dans la gamme spectrale et la gamme de température considérée [30]. Ces étapes ont été réalisées aux fréquences à étudier. Les tensions maximales appliquées sont maintenues constantes lors de cette évaluation. Les résultats sont donnés dans le [Tableau 1](#).

Tableau 1
Incidence de la fréquence de modulation sur la mesure d'émissivité

fréquence (mHz)	période (s)	amplitude de la modulation de température (K)	émissivité	écart type
25,0	40	2,0	0,70	0,04
12,5	80	3,5	0,68	0,01
8,33	120	5,2	0,71	0,02
5,0	200	7,6	0,73	0,02

Les émissivités mesurées sont sensiblement constantes pour les fréquences testées. L'incertitude est cependant réduite aux faibles fréquences. En effet, l'amplitude thermique s'accroît lorsque la fréquence décroît. D'autre part, il convient de tenir compte de l'inertie thermique de la source infrarouge. Une fréquence trop grande, et donc des périodes trop courtes, conduiront à une dissipation insuffisante de la source infrarouge lors des cycles de chauffe de la modulation thermique. Le risque d'échauffement de l'ensemble s'accroîtrait et l'hypothèse d'une température constante et égale entre la source et l'échantillon ne serait plus respectée. Bien que les faibles fréquences améliorent la précision, elles accroissent néanmoins le temps de mesure, ce qui peut être rédhibitoire. Un compromis est donc indispensable, et s'est porté sur la fréquence de 12,5 mHz.

■ Protocole expérimental de mesure de l'émissivité

La fréquence de modulation en température de la source a été fixée à 12,5 mHz (période de 80 s) et l'amplitude de la tension de commande de l'amplificateur de puissance a été fixée à 3 V. Chaque mesure a été réalisée en prenant en compte 10 périodes entières du signal de modulation et dure donc 800 s, soit 13 min 20 s.

La mesure de l'émissivité d'un matériau peut être résumée comme suit :

- préchauffage du dispositif sur le même nombre de périodes que pour une mesure,
- étalonnage à l'aide du matériau aluminium ($\epsilon_{\text{réf}}=0,063$) [31],
- validation de la mesure à l'aide d'alumine massive pure à 99,7 %,
- cinq mesures consécutives d'émissivité sur le matériau étudié.

Le préchauffage permet d'obtenir un dispositif en équilibre thermique et évite des dérives de température. Les valeurs d'émissivités reportées sont des valeurs moyennes, ainsi que leurs écarts types.


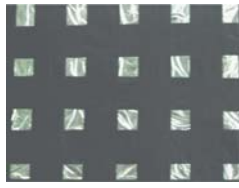
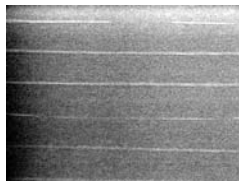
› Effet de la composition de surface

Les matériaux de l'infrastructure routière sont extrêmement hétérogènes, à l'exemple des revêtements routiers qui sont des mélanges de granulats, d'un liant bitumineux, de sable et mastics d'origines diverses. Ces compositions peuvent donc induire des variations de l'émissivité. Cet aspect est essentiellement critique en raison de l'usure des revêtements par le trafic. Cette usure entraîne l'apparition des granulats, et une érosion de la microrugosité, et « matage » de la macrorugosité. Schématiquement, une route neuve est initialement entièrement recouverte de bitume. Ce bitume est alors progressivement enlevé par le passage des pneumatiques pour laisser de plus en plus apparaître les granulats, et est altéré par les ultraviolets. La valeur de l'émissivité du matériau est alors due à la fois au bitume et aux granulats, la nature du substrat affectant aussi la mesure [32]. Cependant, l'usure du revêtement modifie sa rugosité et sa composition de surface de manière simultanée. Une surface plus lisse présente une émissivité moindre qu'une surface rugueuse, toutes choses égales par ailleurs.

Afin d'évaluer l'impact d'un changement de composition d'un matériau sur son émissivité, une série de mesures a été entreprise. Une feuille d'aluminium alimentaire, matériau très peu émissif, a été recouvert de bandes adhésives noires, très émissives. Trois schémas (bandes parallèles, et quadrillage, puis ruban adhésif uniquement) ont été choisis. En effectuant une binarisation des images des surfaces étudiées, une estimation des fractions de surface occupées par l'aluminium φ_{Al} et par le ruban adhésif $\varphi_{adhésif}$ a pu être obtenue. L'émissivité a été mesurée dans chaque cas, puis comparée à celle d'une surface entièrement recouverte de ruban adhésif (Tableau 2).

La variation d'émissivité est définie comme $(\varepsilon_{adhésif} - \varepsilon_{Al+adhésif}) / \varepsilon_{adhésif}$. Il apparaît clairement que le dispositif est capable de mesurer des émissivités faibles. Une modification significative de la composition induit une variation importante de l'émissivité. Supposons que l'émissivité de la surface peut s'écrire de la manière suivante : $\varepsilon = \varphi_{adhésif} \cdot \varepsilon_{adhésif} + \varphi_{Al} \cdot \varepsilon_{Al}$, avec 0,01 d'émissivité pour l'aluminium, et 0,95 pour le ruban adhésif. On constate que, sur les mesures, l'accord est assez bon entre les émissivités calculées et mesurées. L'usure d'un revêtement routier aura deux principaux effets : les granulats deviennent apparents et contribuent directement au bilan radiatif, et la rugosité se réduit (« matage » des aspérités). Dans le premier cas, il apparaît alors que la variation d'émissivité sera importante si le contraste d'émissivité entre le bitume et les granulats (ici représentés par les éléments d'aluminium) est important.

Tableau 2
Effet de la variation de la composition sur la valeur de l'émissivité


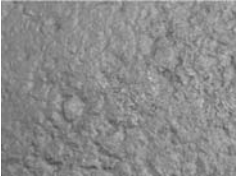
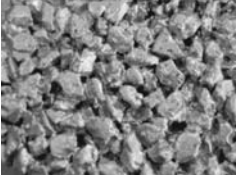
composition	$\varphi_{adhésif}$ (%)	φ_{Al} (%)	émissivité calculée	émissivité mesurée	écart type	variation d'émissivité (%)
feuille d'aluminium avec bandes parallèles 	44	56	0,42	0,37	0,01	61
feuille d'aluminium avec quadrillage 	81	19	0,76	0,76	0,01	19
ruban adhésif noir 	-	-	-	0,95	0,01	0

► Impact de la rugosité sur la mesure d'émissivité

La rugosité des revêtements des chaussées permet, parmi d'autres éléments, de maintenir un bon niveau d'adhérence pour les véhicules. Cependant, plus cette rugosité est élevée, plus le revêtement peut être froid, comme dans le cas des revêtement drainants. D'autre part, comme indiqué dans la littérature [25, 33], l'émissivité d'un matériau peut être affectée de manière significative par la rugosité.

L'effet de la rugosité a été étudié avec différentes structures de revêtements routiers. Une peinture aluminium (Rust Oleum n° 2115, de RPM Company) a été appliquée par pulvérisation sur une surface en PVC lisse, et deux revêtements routiers de structures et macrorugosité différentes. Les résultats sont consignés dans le **tableau 3**.

Tableau 3
Effet de la rugosité sur la valeur de l'émissivité

rugosité	émissivité	écart type	variation d'émissivité (%)
peinture aluminium sur surface lisse 	0,34	0,01	0
peinture aluminium sur revêtement peu rugueux 	0,42	0,01	22
peinture aluminium sur revêtement très rugueux 	0,69	0,02	101

La variation d'émissivité est définie comme $(\epsilon_{\text{rugueux}} - \epsilon_{\text{lisse}}) / \epsilon_{\text{lisse}}$. La rugosité peut être assimilée à une succession de « pics » et de « vallées ». Ces dernières sont parfois, pour des revêtements, plus profondes que larges. Elles peuvent alors être assimilées à des pseudo corps noirs insérés dans la structure de surface, contribuant à faire croître l'émissivité. D'autre part, en raison de cette rugosité et selon la direction d'observation, certaines parties de la surface sont masquées en appliquant une approche fondée sur l'optique géométrique, comme indiqué par Sayapina *et al.* [33]. Dans le cas de matériaux opaques et peu réfléchissants, une partie du flux infrarouge qui aurait été réfléchi par le même matériau avec une surface lisse, n'est alors plus accessible. Le coefficient de réflexion ρ décroît. Dans le cadre de l'hypothèse de la loi de Kirchhoff ($\epsilon=1-\rho$), l'émissivité va alors augmenter.

Sayapina *et al.* [33] proposent un profil pour décrire une surface rugueuse. Il s'agit d'une juxtaposition de petits éléments microscopiques plats, chacun faisant un angle donné avec la direction d'observation. Le flux reçu par la thermopile provient à la fois de l'émission directe par ce corps et de la réflexion par chacun de ces éléments microscopiques. L'émissivité totale directionnelle pourrait donc s'écrire de la manière suivante : $\epsilon = \epsilon_{\text{réflexion}} + \epsilon_{\text{émission}}$.

Sayapina *et al.* [33] ont établi l'expression de l'émissivité pour une surface rugueuse dans le cadre de l'optique géométrique et en considérant une seule réflexion. Les travaux avaient porté sur des métaux. En s'appuyant sur cette description, l'émissivité due à l'émission peut s'écrire :



$$\epsilon_{\text{émission}}(\theta) = \frac{1}{\cos(\theta)} \cdot \int_{-\frac{\pi}{2}+\theta}^{\frac{\pi}{2}-\theta} \epsilon(\delta-\theta) \cdot \frac{\cos(\delta-\theta) \cdot f(\delta)}{\cos(\delta)} d\delta \quad (7)$$

Dans la situation présente, l'angle d'observation θ est de 15° par rapport à la normale à la surface considérée. $f(\delta)$ est la distribution des pentes des petits éléments de surface par rapport à la normale à la surface. Elle est supposée gaussienne et prend la forme :

$$f(\delta) = \exp(-q \cdot \tan^2(\delta)) \quad (8)$$

Plus le paramètre de rugosité q est élevé, plus la distribution est étroite et la surface lisse. La partie réflexion par la rugosité de l'émissivité $\varepsilon_{\text{réflexion}}$ dépend de la direction d'observation. Dans ce cas-ci, l'angle est inférieur à $\pi/6$. Sur la base des travaux cités [33] et en s'appuyant sur des données et l'analyse présentée dans la méthode d'essai n° 50 (Annexe M1.2) (document interne LCPC), la rugosité de certains revêtements est donnée dans le **tableau 4**.

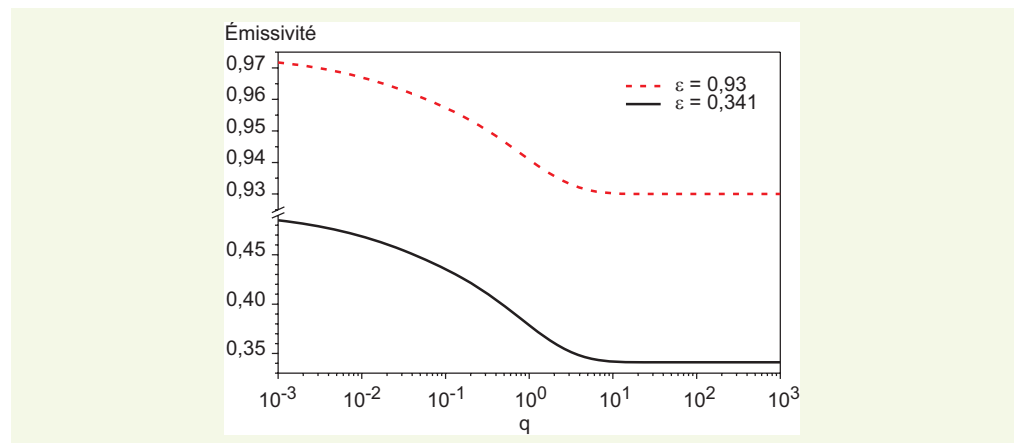
Tableau 4
rugosité de quelques revêtements

type de chaussée	rugosité (mm)	paramètre q
BBSG 	$0,25 < Ra < 0,73$	2
BBTM, BBUM, BBM 	$0,26 < Ra < 1,95$	0,5

L'évolution de l'émissivité avec la rugosité établie pour $\theta = 15^\circ$ est représentée sur la **Figure 2**. Deux situations ont été considérées. La peinture aluminium lisse (émissivité 0,34), et un échantillon routier (émissivité 0,93). Le modèle de Sayapina conduit à un accroissement de l'émissivité avec la rugosité (i.e. lorsque q décroît). Pour des valeurs de q au-delà de 10, la rugosité n'affecte plus la valeur de l'émissivité.

Le premier cas considéré a été celui de la peinture aluminium lisse dont les mesures ont été présentées précédemment. lorsque appliquée sur un support PVC. Pour $q=0,22$ illustrant une chaussée peu rugueuse recouverte de peinture aluminium, on obtient une valeur numérique proche de la valeur 0,42 expérimentale. Cependant, l'émissivité mesurée de 0,69, qui correspond à une chaussée très rugueuse, n'a pas pu être reproduite numériquement. Les limites du modèle de Sayapina, avec une réflexion unique, sont sans doute atteintes. Les réflexions multiples du flux infrarouge doivent être

Figure 2
Variation de l'émissivité (calculée avec le modèle de Sayapina) pour une direction d'observation de $\theta = 15^\circ$ en fonction du paramètre de rugosité q



prises en compte. Cela est particulièrement le cas avec des surfaces à faible émissivité comme la peinture aluminium. D'autre part, des matériaux possèdent des bandes d'absorption en infrarouge. Cette caractéristique peut donc également affecter l'émissivité mesurée par rapport à celle calculée qui ne prend pas en compte ce phénomène.

Pour la surface lisse d'émissivité 0,93, valeur représentative des mesures effectuées sur des revêtements routiers, l'utilisation du modèle de Sayapina conduit à des variations de 0,93 à 0,97 selon la rugosité. Pour $q=2$, $\varepsilon=0,94$, et pour $q=0,5$, $\varepsilon=0,95$. Une telle différence pourrait être reliée au commentaire fait dans l'introduction selon lequel une variation d'émissivité conduisait à une variation de température lors d'une modélisation.

Ainsi, la baisse de la rugosité de surface et l'abrasion de la couche de bitume superficielle par zones, signe de l'usure du revêtement, vont provoquer une baisse de l'émissivité de la chaussée.

› Cas de matériaux de l'infrastructure routière

Des mesures d'émissivité ont été entreprises avec différents matériaux apparaissant dans l'infrastructure routière, sans vouloir se montrer exhaustif. Les matériaux retenus étaient les suivants : béton bitumineux semi-grenu peu circulé, béton bitumineux semi-grenu circulé, béton hydraulique, panneau de circulation de signalisation temporaire, acier glissière de sécurité, marquage horizontal (appliquée sur support PVC). Les mesures ont été réalisées en suivant le protocole expérimental décrit. Les résultats sont rassemblés dans le [tableau 5](#).

Tableau 5
Émissivités à température ambiante dans la bande spectrale 1-20 μm

matériau	émissivité	écart type
béton bitumineux semi-grenu peu circulé	0,93	0,02
béton bitumineux semi-grenu circulé	0,93	0,01
béton hydraulique	0,97	0,01
panneau de circulation de signalisation temporaire	0,96	< 0,01
acier galvanisé (glissière de sécurité)	0,27	0,01
marquage horizontal (peinture blanche)	0,96	< 0,01

On constate que les émissivités restent proches de 1 dans la bande spectrale qui a été choisie, à l'exception de l'acier de glissière de sécurité. Comme pour de nombreux métaux, son caractère émissif est faible.

CONCLUSION

Un dispositif de mesure de l'émissivité directionnelle totale (bande 1-20 μm) des matériaux à température ambiante a été développé. Il a fait preuve d'une bonne capacité dans la détermination de ce paramètre physique employé dans les modèles d'échanges thermiques pour la prévision de la température de surface. La modulation thermique en fréquence et la durée totale de mesure peuvent être choisies pour être compatibles avec des mesures sur site. Le respect de l'égalité de température entre la source infrarouge et le matériau à analyser doit être respectée. La répétabilité de la mesure est correcte. Les mesures d'émissivité ont été entreprises pour une gamme large de valeurs d'émissivité, pour différentes compositions de surface et différentes rugosités. Le dispositif peut être déplacé sur un site de mesure, si les conditions ambiantes restent suffisamment stables.

La détermination de l'émissivité d'un matériau ne dépend pas de la fréquence de modulation. Le choix de cette fréquence a un impact sur la durée de mesure. Plus la fréquence est importante, plus la durée de mesure est faible. Cependant, l'inertie thermique de la source infrarouge doit être prise en compte. Plus la fréquence est haute et moins la source infrarouge dispose de temps pour dissiper l'énergie de la phase de chauffage. Une fréquence trop courte pourra également affecter l'équilibre thermique de la source infrarouge en raison de son inertie, affectant ainsi la précision de la mesure.

Cela peut induire une dérive de la température du système, celle-ci n'étant alors plus celle ambiante. La fréquence de 12,5 mHz s'avère être un bon compromis, sans rendre la durée d'une mesure prohibitive. L'application développée sous LabVIEW™ comprend un module de calcul d'émissivité au cours de la mesure à la fin de chaque période de modulation. Lorsque l'émissivité a atteint une valeur stable (par exemple variation inférieure à 0,01), la mesure peut être considérée comme terminée. Le dispositif peut se prêter à des mesures sur le terrain. Cependant, la durée des mesures doit être telle que les variations thermiques ambiantes doivent demeurer suffisamment faibles.

Les mesures conduites sur les matériaux de l'infrastructure routière conduisent à des valeurs autour de 0,95 (sauf pour l'acier des glissière de sécurité qui présente une émissivité de 0,27). La rugosité et la composition de surface peuvent être liées à l'usure du revêtement de chaussée, particulièrement pour des bétons bitumineux. Des mesures ont été effectuées sur un même matériau appliqué sur des revêtements routiers de rugosité croissante. La variation d'émissivité en présence de rugosité pouvait atteindre 100 % de celle obtenue pour une surface lisse. D'autre part, des hétérogénéités artificielles de composition ont induit des variations de près de 60 % par rapport à une surface homogène. Un fort contraste d'émissivité entre les matériaux est nécessaire pour obtenir une variation significative. Ces mesures impliquent par exemple qu'une usure d'un BBSG pourrait conduire, selon la nature des granulats, à une diminution de l'émissivité, accentuée par une décroissance de la rugosité du revêtement. Comme indiqué dans l'introduction, une variation d'émissivité de 0,92 à 0,98 pourrait conduire à un écart de température de 1,3°C [2]. L'émissivité d'un bitume pur est proche de 1, et correspond à un revêtement neuf. L'émissivité d'un granulat varie autour de 0,90 selon sa nature. Le vieillissement d'un revêtement pourra donc entraîner une modification significative de son comportement radiatif, et avoir des implications en matière d'exploitation hivernale. Dans le cas d'un profil transversal de chaussée, en fonction de l'utilisation des différentes voies et donc de l'usure correspondante, on peut s'attendre à détecter un gradient d'émissivité. Une distinction d'émissivité parmi les grandes familles de revêtements pourrait être envisagée notamment pour les différentes rugosités et pour des âges différents.

Les différences constatées entre une caméra infrarouge FLIR S65 et l'émissomètre indiquent qu'un approfondissement est nécessaire. Des mesures précises méritent d'être entreprise avec un émissomètre permettant de travailler dans la bande spectrale 7-14 µm avec la thermopile adaptée, et autant que possible dans différentes directions.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 **AUBERT D., BLOSSEVILLE J.-M.** et al. *La route automatisée. Réflexions sur un mode de transport du futur*, rapport LCPC, **1998**, 89 pages.
- 2 **BETTINELLI, J., LIVET J.** *Etude de la contribution des propriétés physiques des diverses structures de chaussées aux difficultés d'exploitation hivernale*, rapport LCPC, **2001**, 31 pages.
- 3 **HOLMAN J. P.** *Heat Transfer 8th edn*, **1997**.
- 4 **KATEB T., CHEVALIER J.-L.** *OPTORA et les techniques de mesure de l'émissivité : l'émissomètre calorimétrique de référence*, Cahiers du CSTB, **1991**, livraison 323 (cahier 2524).
- 5 **HERVÉ P.** *Mesure de l'émissivité thermique*, Techniques de l'Ingénieur, chapitre Température de surface, **1989**.
- 6 **SIROUX M., TANG-KWOR E., ESPECEL D., MATTÉI S.** Emissivity measurement by sine wave thermal modulation : radiometric and calorimetric approaches, *High Temp.-High pressures*, vol **30**, **1998**, pp. 217-22.
- 7 **SIROUX M., TANG-KWOR E., MATTÉI S.** A periodic technique for emissivity measurements of insulating materials at moderate temperature, *Meas. Sci. Technol.*, vol **9**, **1998**, pp. 1956-62.
- 8 **FURUKAWA T., LUCHI T.** Experimental apparatus for radiometric emissivity measurements of metals *Rev. Sci. Instrum.* vol **71**, **2000**, pp. 2843-7.
- 9 **PANTINAKIS A., KORTSALIOUDANIS N.** A simple high-sensitivity radiometer in the infrared for measurements of the directional total emissivity of opaque materials at near-ambient temperatures, *Int. J. Thermophys.*, vol **22**, **2001**, pp. 1843-54.
- 10 **SABUGA W., TODTENHAUPT R.** Effect of roughness on the emissivity of the precious metals silver, gold, palladium, platinum, rhodium, and iridium, *High Temp.-High Pressures*, vol **33**, **2001**, pp. 261-9.
- 11 **ESPECEL D., MATTÉI S.** Total emissivity measurements without use of an absolute reference, *Infrared Phys. Technol.* vol **37**, **1996**, pp. 777-84.
- 12 **MATTÉI S., ESPECEL D.** Periodic technique for low temperature radiative property, *ASME Heat Transfer division*, vol **1**, **1996**.
- 13 **PERRAD Y.** *OPTORA et les propriétés optiques des matériaux macroscopiquement hétérogènes : la mégasphère et le réflectomètre à grande ouverture*, Cahiers du CSTB, **1991**, n° 2523, 16 pages.
- 14 **Devices and Services company**, <http://www.devicesandservices.com/prod03.htm>
- 15 **PAUMIER J.-L., ARNAL M.** et al. *Paramètre radiatif. Projet de développement d'un appareil de mesure de l'émissivité des chaussées. Sujet 1 66 04 9*, **1999**, rapport LCPC.
- 16 **FRANCOU L., SADOU A., RAMEL D., TEJEDA J.-C., HERVÉ P.** *Mesure directe de l'émissivité à basse température : Méthodes et techniques optiques pour l'industrie» Congrès de Belfort*, **2003**, pp 104-109.
- 17 **SHUNLIN LIANG.** Inversion of land surface temperature and emissivity simultaneously from multispectral thermal infrared imagery». *IGARSS 2000. IEEE 2000 Proceedings Cat. No. 00CH37120*, **2000**, vol 7, pp 3133-5.
- 18 **BECKER F., ZHAO LIANG L.** Surface temperature and emissivity at various scales : definition, measurement and related problems *Remote Sens. Rev.*, vol **12**, **1995**, pp. 225-53.
- 19 **PAUMIER J.-L., ROUMEAU S.** et al. *Radiométrie infrarouge- Rappels et méthodes de caractérisation de l'émissivité*, **1997**, rapport LCPC, 31 pages.
- 20 **MALAPLATE A.** *Radiométrie IR : développement et validation de méthodes utilisant la bande 3-5 micromètre pour la détermination des paramètres de surface à haute résolution spatiale*, Thèse de doctorat de l'université ULP1, Strasbourg, **2001**, 155 pages.
- 21 **PIETRAS C., ABUHASSAN N., HAEFFELIN M., BROGNIEZ G., LEGRAND M., BUIS J.-P.** Development of a high precision thermal infrared field radiometer» *Proc. 6th Int. Symp., Physical measurements and signatures in remote sensing*, Val d'Isère, France, **1998**.
- 22 **BOY C.** *Faisabilité de la détermination de l'émissivité IR et de l'état d'un revêtement de chaussée à l'aide d'un radiomètre multispectral*, **1999**, rapport LCPC, 38 pages.
- 23 **DAMIRI B., LEGRAND M., et al.** *Programme de recherche et d'expérimentation destiné à déterminer la température de surface de la chaussée, son émissivité et son état de surface par une technique radiométrique sans contact*, **2000**, rapport LCPC, 37 pages.
- 24 **ROYER A., CHAGNON F.** *Système de mesures embarquées sur un véhicule de patrouille de viabilité hivernale – Amélioration de la mesure de température de surface et évaluation de l'état des routes*, **2004**, rapport de recherche MTQ FCAR Research Program 00-SR-71260.
- 25 **GAUSSORGUES G.** *La thermographie infrarouge*, Techniques et Documentation, **1981**, 386 pages.
- 26 **MADDING R. P.** Emissivity measurement and temperature correction accuracy considerations, *Proc. SPIE 3700*, **1999**, pp. 393-401.
- 27 **MADDING R. P.** Temperature dependence of the graybody approximation to emissivity for some common materials, *Proc. SPIE 4170*, **2002**, pp. 37-43.
- 28 **WIGGENHAUSER H.** Active IR applications in civil engineering» *Infrared Phys. Technol.*, vol **43**, **2002**, pp. 233-8.
- 29 **HOLZWARTH F., EICHHORN U.** Non-contact sensors for road conditions, *Sensors Actuators A*, vol **37-38**, **1993**, pp. 121-7.
- 30 **MATTÉI S.** *La métrologie infrarouge en régime périodique et son application à la caractérisation thermophysique des matériaux*, Thèse de doctorat Université Paris XII-Val de Marne, France, **1999**.
- 31 **DATCU S., IBOS L., CANDAU Y., MATTÉI S.** Improvement of building wall surface temperature measurements by infrared thermography, *Infrared Phys. Technol.*, vol **46**, **2005**, pp. 451-67.
- 32 **WOLFE W. L.** *Handbook of Military Infrared Technology*, 1965, 906 pages.
- 33 **SAYAPINA V. I., SVET D. YA, POPOVA O R.** Influence of surface roughness on the emissivity of metals, *A. A. Bailov Institute of Metallurgy, Academy of Sciences of the USSR*, vol **10**, **1972**, pp. 528-535.

