Mesure d'émissivité pour la thermographie infrarouge appliquée au diagnostic quantitatif des structures

Jean-Pierre Monchau

▶ **To cite this version:**

Jean-Pierre Monchau. Mesure d'émissivité pour la thermographie infrarouge appliquée au diagnostic quantitatif des structures. Autre. Université Paris-Est, 2013. Français. NNT : 2013PEST1128 . tel-00952076

HAL Id: tel-00952076

https://theses.hal.science/tel-00952076

Submitted on 7 Apr 2014

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.

Université Paris-Est
Ecole Doctorale SIE (Sciences, Ingénierie, Environnement)

Doctorat

Spécialité : Sciences de l'ingénieur

MESURE D'EMISSIVITE POUR LA THERMOGRAPHIE INFRAROUGE APPLIQUEE AU DIAGNOSTIC QUANTITATIF DES STRUCTURES

Jean-Pierre MONCHAU

Centre d'Etude et de Recherche en Thermique, Environnement et Systèmes
CERTES - *EA3481*, Université Paris-Est Créteil - Val de Marne

Soutenance prévue le 28 novembre 2013 devant le jury composé de :

Mme Monica SIROUX, Professeur à l'INSA de Strasbourg	Rapporteur
M. Patrick ECHEGUT, Directeur de Recherches CNRS-CEMHTI (UPR 3079)	Rapporteur
M. Xavier MALDAGUE, Professeur à l'Université Laval, Québec	Examinateur
M. Jean-Luc BODNAR, Maître de Conférences à l'URCA	Examinateur
M. Jacques HAMEURY, Ingénieur de Recherche au LNE	Examinateur
M. Laurent IBOS, Maître de Conférences HDR à L'UPEC	Examinateur
M. Jean DUMOULIN, Ingénieur de Recherche à l'IFSTTAR	Examinateur
M. Yves CANDAU, Professeur à L'UPEC	Directeur de Thèse

9 octobre 2013

Table des matières

Remerciements **1**

Introduction **3**

1 Contexte général de l'étude **7**
1.1 Rappels sur les transferts thermiques 7
1.1.1 Etude d'un système thermique soumis à des échanges de chaleur . . . 7
1.1.2 Transfert par conduction 7
1.1.3 Transfert par convection 8
1.1.4 Transfert par rayonnement 9
1.1.5 Exemple de cas réel 10
1.2 Les transferts thermiques radiatifs 11
1.2.1 Le rayonnement du corps noir 11
1.2.2 Rayonnement des corps réels 12
1.2.3 Les différentes définitions de l'émissivité 13
1.2.4 Quelques cas particuliers 15
1.2.5 Calcul de l'émissivité d'un matériau à partir de son indice complexe . 16
1.3 Calcul des transferts thermiques radiatifs 20
1.4 La thermographie infrarouge comme moyen d'investigation pour le diagnostic quantitatif des structures 22
1.4.1 Les mesures par thermographie infrarouge : généralités 22
1.4.2 Mesure de température d'une surface par thermographie 25
1.4.3 Erreur de mesure de la température due à l'erreur sur l'émissivité . . 30
1.4.4 Erreur de mesure de la température due à l'erreur sur la température d'environnement 31
1.4.5 Erreur de mesure de la température due à la négligence de la transmission atmosphérique 31
1.4.6 Récapitulatif des erreurs possibles de mesure de la température par thermographie 32

2 Les méthodes de mesure de l'émissivité **33**
2.1 Pourquoi mesurer l'émissivité ? 33
2.2 Méthode calorimétrique 35
2.2.1 Principe de la méthode 35
2.2.2 Avantages et limites de la méthode 37
2.3 Méthode radiométrique 38
2.3.1 Méthode par mesure directe du flux émis par la surface 38

2.3.2 Méthode radiométrique périodique 39
2.4 Méthode réflectométrique, méthodes indirectes 40
2.4.1 Principe 40
2.4.2 Méthode par sphère intégrante 41
2.4.3 Méthode utilisant une source modulée 41
2.5 Exemple d'appareils commerciaux de mesure de l'émissivité 46
2.5.1 Appareil utilisant une source modulée : Temp 2000A de AZ-Technology 46
2.5.2 Appareil utilisant une méthode réflectométrique non modulée : TIR100-2 de INGLAS 48
2.5.3 Appareil utilisant une méthode réflectométrique non modulée : AE de D&S 50
2.6 Erreurs de mesures de l'émissivité dues à la méthode de mesure utilisée . . . 50
2.6.1 Erreurs dues à la limitation de la bande spectrale 50
2.6.2 Erreurs dues au caractère non gris du matériau à mesurer 52
2.6.3 Erreurs dues à la sensibilité du détecteur 55
2.6.4 Erreurs dues à la modulation de la température de la source 58
2.6.5 Erreurs dues à la valeur de l'émissivité de la source 59
2.7 Etude des textes normatifs sur la mesure de l'émissivité 62
2.7.1 Norme ASTM E408 63
2.7.2 Norme ASTM C835 63
2.7.3 Norme ASTM C1371 63
2.7.4 Norme NF-EN 12898 64

3 Un nouveau dispositif de mesure de l'émissivité par réflectométrie modulée 65
3.1 Le nouvel appareil développé au CERTES 65
3.1.1 Principe 66
3.1.2 Contraintes et choix techniques pour la réalisation de l'émissomètre . 66
3.1.3 Description 68
3.1.4 Traitement du signal 69
3.1.5 Extraction des propriétés radiatives à partir des mesures de réflexion 73
3.2 Etude des performances du nouvel appareil 76
3.2.1 Variation de l'étalonnage de l'appareil 76
3.2.2 Modification de la géométrie du système de détection 77
3.2.3 Evolution possible de l'appareil 82

4 Mesures effectuées avec le nouveau dispositif 85
4.1 Mesures effectuées grâce au spectromètre FTIR 86
4.1.1 Détermination du coefficient de réflectance directionnel hémisphérique spectral absolu avec une sphère intégrante 89
4.2 Etude comparative des méthodes radiométrique et calorimétrique de mesure d'émissivité au CERTES et au LNE 91
4.2.1 Méthodes utilisées 92
4.2.2 Les échantillons 92
4.2.3 Résultats des mesures 93
4.3 Mesure effectuées *in-situ* sur un bâtiment 102

4.4 Mesures effectuées *in-situ* sur des échantillons de route dans le cadre de l'opération de recherche PALM 103
4.5 Mesures effectuées sur des échantillons de fresques et de peintures d'art . . . 108

Conclusion générale **113**

Bibliographie **117**

Table des figures

1.1 Bilan énergétique d'un système thermique en interaction avec l'environnement 8
1.2 h_c en fonction de la vitesse du vent v pour une température de 283 K selon la norme ISO-6946 pour la convection naturelle 9
1.3 Transfert thermique dans le cas d'une paroi de résistance thermique R_M . . 11
1.4 Coordonnées sphériques et définition de l'angle solide pour le calcul de la luminance en fonction de la direction 13
1.5 Emissivité totale directionnelle en fonction de la direction. D'après X.P. Maldague "Theory and practice of infrared technology for non destructive testing" [2] 15
1.6 Réflexion spéculaire sur un dioptre plan : présentation des grandeurs géométriques 16
1.7 Emissivité directionnelle en fonction de l'angle pour un diélectrique d'indice de 1.5, d'après L. Kauder, Spacecraft Thermal Control Coatings References, NASA/Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, NASA [11] . . . 18
1.8 Rapport entre l'émissivité hémisphérique et l'émissivité directionnelle normale en fonction de l'émissivité directionnelle normale pour les diélectriques lisses, d'après L. Kauder, Spacecraft Thermal Control Coatings References, NASA/Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, NASA/TP [11] . 18
1.9 Emissivité directionnelle en fonction de l'angle pour un métal ayant pour indice de réfraction : $n = 5.7 + 9.7 \cdot i$, d'après L. Kauder, Spacecraft Thermal Control Coatings References, NASA/Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, NASA [11] 19
1.10 Rapport entre l'émissivité hémisphérique et l'émissivité directionnelle normale en fonction de l'émissivité directionnelle normale pour les conducteurs lisses, d'après L. Kauder, Spacecraft Thermal Control Coatings References, NASA/Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, NASA [11] . . . 20
1.11 Shéma de principe du fonctionnement d'une caméra thermique 22
1.12 Caméras FLIR© 23
1.13 Caméra FLUKE© TI-32 23
1.14 Variation de la transmission de l'atmosphère en fonction de la longueur d'onde d'après [6] 24
1.15 Emittance dans la bande III en $\mathrm{W} \cdot \mathrm{m}^{-2}$ et sa régression en T^4 en fonction de la température en K 26
1.16 Schéma de l'observation d'une scène thermique par thermographie IR 27
1.17 Exemple d'image thermique montrant des ponts thermiques dus à des rails de pose de plaques de plâtre 27

1.18 Miroir d'aluminium diffusant selon la norme ASTM E1862-97 29
1.19 Courbes typiques du facteur moyen de transmission de l'atmosphère en fonction de la distance de mesure, pour une atmosphère à 50% d'humidité relative, daprès 'Thermographie Principes et Mesures', Technique de l'ingénieur, D. Pajani [5] 30

2.1 Schéma d'un dispositif de mesure de l'émissivité par la méthode calorimétrique : (A) raccord vers la pompe à vide ; (B) fils électriques d'alimentation et de mesure ; (C) bornier thermostaté ; (D) échantillon ; (E) cryostat ; (F) enceinte de mesure refroidie sous vide 37
2.2 Schéma d'un dispositif de mesure de l'émissivité par la méthode radiométrique : (A) échantillon ; (B,F) enceinte refroidie ; (C) miroir basculant permettant de viser alternativement l'échantillon ou le corps noir ; (D) système de détection du flux infrarouge ; (E) corps noir 39
2.3 Schéma d'un dispositif de mesure de la réflexion directionnelle hémisphérique par la méthode de la sphère intégrante 42
2.4 Schéma d'un dispositif de mesure de la réflexion hémisphérique directionnelle en utilisant une cavité modulée en température 43
2.5 Schéma et photo de l'émissomètre EM1 à cavité modulée en température . . 44
2.6 Exemple de signaux mesurés avec l'émissomètre EM1 : température source (b), tension thermopile (d) ; FFT correspondantes (a) et (c) respectivement ; données obtenues lors de la caractérisation d'un échantillon de glissière de sécurité en acier galvanisé 45
2.7 Schéma de l'émissomètre Temp-2000 de AZ-Technology issus du brevet déposé par AZ-Technology (patent number 5659397) 47
2.8 Photos de l'émissomètre Temp-2000 de AZ-Technology 47
2.9 Emissomètre TIR100-2, A : en cours de mesure, B : vue de la cavité émissive (documentation INGLAS®) 48
2.10 Emissomètre TIR100-2, A : principe de fonctionnement, B : méthode d'étalonnage (documentation INGLAS®) 49
2.11 Emissomètre AE de Devices and Services®, A : Vue de la thermopile, B : Photo de l'appareil, C : schéma en coupe de l'émissomètre (documentation D&S®) 51
2.12 Emissivité totale directionnelle d'une surface dichroïque en fonction de la température pour une longueur d'onde de coupure $\lambda_c = 10\,\mu$m 54
2.13 Abaque des écarts d'émissivité en fonction du saut de réflectance spectrale en % et de la température en K 55
2.14 Réflectance spectrale de l'alumine entre 2 et 20 μm mesurée grâce à une sphère intégrante PIKE© et un spectromètre Perkin Elmer© FRONTIER FT-IR NIR/MIR 56
2.15 Emissivité totale directionnelle de l'alumine en large bande et bande-III en fonction de la température 57
2.16 Comparaison entre le rayonnement d'un corps noir à 300 K et à 305 K, la différence est illustrée en bleu 60
2.17 Comparaison entre les courbes de rayonnement normalisées d'un corps noir à 300 K, à 360 K et la différence entre deux sources à 300 K et à 305 K 61

2.18 Ecart $\Delta\rho$ entre la valeur de la réflectance mesurée et réelle en fonction de la réflectance mesurée ρ_m pour une valeur de $\rho_p = 0.05$ 62

3.1 Schéma de l'émissomètre. Voir paragraphe 3.1.3 pour les légendes 70
3.2 Vue d'ensemble de l'émissomètre. Voir paragraphe 3.1.3 pour les légendes . . 71
3.3 Tête de mesure 71
3.4 Mesure in-situ de l'émissivité d'un revêtement de sol 71
3.5 Emissomètre EM2 71
3.6 Traitement analogique du signal 72
3.7 Traitement numérique du signal 72
3.8 Exemple de signal temporel mesuré 72
3.9 Exemple de représentation fréquentielle des signaux mesurés 72
3.10 Image thermique de la cavité de l'émissomètre 78
3.11 Evolution de la température des différentes parties de la cavité de l'émissomètre en °C en fonction du temps 79
3.12 Evolution des écarts de température des différentes parties de la cavité de l'émissomètre en °C en fonction du temps 80
3.13 Modification de la géométrie de l'émissomètre (en orange, l'angle de vue des détecteurs) : avant modification (A), après modification (B) 81
3.14 Exemple de cylindre déployé 82
3.15 Vues en perspective et en coupe d'une nouvelle version de l'émissomètre . . . 83

4.1 Photo du spectromètre FTIR utilisé : (a) vue générale, (b) détail de l'accessoire à sphère intégrante 87
4.2 Comparaison de la réflectance de l'étalon du LNE et de celui du CERTES . . 87
4.3 Modélisation de la réflectance de référence en or du CERTES par une régression polynomiale de degré 6 88
4.4 Ecart en % entre la modélisation de la réflectance de référence en or du CERTES et sa mesure effectuée par le LNE 88
4.5 Schéma représentant les deux positions du miroir basculant interne de la sphère intégrante Pike© 89
4.6 Profilomètre NT-1100 de VEECO© 94
4.7 Profils des différents échantillons mesurés avec le profilomètre NT-1100 de VEECO© 95
4.8 Microscope électronique à balayage du LISA (Laboratoire Inter-universitaire des Systèmes Atmosphériques) 96
4.9 Aluminium poli : image de microscopie électronique à balayage à deux grossissements différents 96
4.10 Aluminium sablé : image de microscopie électronique à balayage à deux grossissements différents 97
4.11 PVC : image de microscopie électronique à balayage à deux grossissements différents 97
4.12 Peinture aluminium : image de microscopie électronique à balayage à deux grossissements différents 98
4.13 Peinture aluminium : image de microscopie électronique à balayage à fort grossissement 98
4.14 Image profilométrique des surfaces étudiées 99

4.15 Spectres de réflectance des échantillons utilisés dans l'étude comparative (réflectance en fonction de la longueur d'onde) 100
4.16 Photos du dispositif de mesure *in-situ* : (a) contre un mur intérieur, (b) sur un sol intérieur, (c) sur un sol extérieur, (d) contre un mur extérieur 103
4.17 Radiomètre PTR5 (photo A) et caméra thermographique FLIR S65 (photo B) utilisés pour le véhicule THERMOROUTE 105
4.18 Véhicule THERMOROUTE 106
4.19 Schéma du véhicule THERMOROUTE : présentation des décalages spatiaux entre les différentes mesures de températures 106
4.20 Thermogrammes effectués avec le véhicule THERMOROUTE - miroir diffusant (élément froid en bas à droite) - carré de peinture Nextel® (à gauche du miroir diffusant) 106
4.21 Résultats des mesures de température avant toute correction. Ts-PTR5 : température de surface de la route mesurée avec le radiomètre, Ts-FLIR : température de surface de la route mesurée avec la caméra thermique FLIR, Tair : température de l'air 107
4.22 Résultats des mesures de température après correction. Ts-PTR5 : température de surface de la route mesurée avec le radiomètre, Ts-FLIR corrigée : température corrigé de surface de la route mesurée avec la caméra thermique FLIR 107
4.23 Principe des peintures composée d'un pigment minéral dispersé dans un liant 108

Liste des tableaux

1.1 Exemple d'erreurs de mesure possibles pour des mesures de température à partir de la luminance mesurée avec une caméra thermique. 32

2.1 Calcul de l'émissivité totale directionnelle de l'alumine en large bande et bande-III en fonction de la température 56

3.1 Mesures d'émissivité d'échantillons de référence en large bande et bande-III . 73
3.2 Pourcentage de répartition entre les réflexions diffuse et spéculaire 76
3.3 Evolution de la température des différentes parties de la cavité de l'émissomètre en °C en fonction du temps 78

4.1 Propriétes des échantillons utilisés pour l'étude comparative sur les mesures d'émissivité au CERTES et au LNE 99
4.2 Tableau comparatif des mesures d'émissivité effectuées au LNE et au CERTES 101
4.3 Exemples de mesures sur des surfaces de bâtiments 103
4.4 Mesures d'émissivité d'échantillons de route en bande large et bande-III . . . 105
4.5 Mesures d'émissivité en large bande et en bande III de différents échantillons de peintures d'art 110
4.6 Mesures d'émissivité en large bande et en bande III de différents échantillons de peintures d'art avec liant colle 111
4.7 Mesures d'émissivité en large bande et en bande III de différents échantillons de peintures d'art classées par type de pigment 111

Remerciements

Je tiens à remercier tous ceux qui m'ont aidé et soutenu durant cette épreuve qu'est la réalisation et la rédaction d'une thèse de doctorat. Je tiens notamment à remercier toute l'équipe THEMACS du CERTES pour m'avoir accueilli, soutenu et encouragé, tous ceux avec qui j'ai collaboré au cours de ces trois années et qui m'ont beaucoup apporté par les multiples échanges que j'ai pu avoir avec eux, et enfin tous ceux qui m'ont aidé par leurs remarques, conseils et encouragements. Je tiens aussi à remercier les instances de l'université d'avoir accepté ma demande de décharge durant trois ans pour me permettre de mener à bien ce projet. Mes pensées vont aussi à ma famille proche qui m'a accompagné au quotidien pendant ce travail de recherche et de rédaction.

Introduction

L'utilisation de la thermographie infrarouge comme outil de contrôle est aujourd'hui courante dans de nombreux domaines industriels ou de recherche. Cet essor rapide est principalement dû aux avancées technologiques récentes qui ont permis la commercialisation de caméras d'entrée de gamme portables, autonomes, faciles d'utilisation et à des coûts de revient réduits. Dans le domaine du bâtiment, les exigences en matière d'économie d'énergie d'une part et la nouvelle règlementation thermique beaucoup plus contraignante d'autre part ont augmenté les exigences du diagnostic thermique. La thermographie s'est développée dans ce contexte et est venue s'ajouter aux outils d'investigation pour le diagnostic thermique. Cependant, l'état de l'art ne permet pas encore d'aboutir par des examens de routine à un diagnostic quantitatif des pertes thermiques et des défauts d'isolation des bâtiments. Les travaux de recherche au sein du CERTES ont permis de démontrer dans le cadre du laboratoire que l'on peut passer du diagnostic qualitatif au diagnostic quantitatif. Plusieurs études ont en outre fait la démonstration que le diagnostic quantitatif est possible *in-situ*. Les travaux entrepris au CERTES en collaboration avec EDF sur la mesure de résistance thermique d'isolation de parois par thermographie active [7] ont permis de démontrer la faisabilité de la mesure quantitative de flux thermique à travers une paroi. Ce travail a été poursuivi dans le cadre d'un projet financé par l'ADEME.

Cette étude a permis de déterminer les limites de la thermographie comme méthode d'estimation de températures de surfaces de parois et de flux instantanés. Parallèlement à ces travaux, l'activité portant sur le développement d'instruments de mesure d'émissivité a été poursuivie au sein du laboratoire. En effet, un des éléments limitant la précision des

mesures par thermographie est la méconnaissance de l'émissivité des surfaces mesurées.

Par ailleurs, dans le domaine des infrastructures routières, la thermographie occupe aujourd'hui une place sans cesse croissante. L'auscultation d'ouvrages d'art par thermographie infrarouge s'est développée et la prévention du risque hivernal a profité aussi des progrès de cette technique d'investigation.

Un travail de recherche a été mené au CERTES en collaboration avec le laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Nancy (CETE de l'Est) dans le cadre de l'opération de recherche PALM (*Prévisions et Alertes en Situation Météo-routière dégradée*) de l'IFSTTAR. En effet, la connaissance de l'émissivité intervient aussi dans l'évaluation du risque hivernal et la détection de défauts dans les revêtements routiers et l'auscultation d'ouvrages d'art par thermographie. Les résultats de ces dernières mesures ont été intégrés à l'opération de recherche *Auscultation des ouvrages d'art par techniques d'imagerie* de l'IFSTTAR.

En vue d'un diagnostic quantitatif des structures, il est donc nécessaire de connaître l'émissivité avec une précision suffisante. Il faut également disposer d'une base de données d'émissivité suffisamment étoffée. Les données de la littérature sont peu exploitables directement. En outre, une base de données ne permet pas toujours de se passer d'une mesure de terrain. Après un tour d'horizon des appareils commerciaux disponibles, il nous a semblé indispensable de développer nous-même notre propre instrumentation. En effet les appareils existants ne permettent pas notamment de choisir la bande spectrale de mesure.

Le premier chapitre est un rappel du contexte dans lequel s'effectue cette étude. On détaille les transferts radiatifs et on expose les différentes définitions de l'émissivité. La mesure de température par thermographie infrarouge y est détaillée. On étudie notamment les causes d'erreur commises par la négligence de certains paramètres comme la température d'environnemment, la valeur de l'émissivité...

Le second chapitre est une étude bibliographique des différentes méthodes de mesure de l'émissivité. On détaille les méthodes directes, comme la méthode calorimétrique, ainsi que les méthodes indirectes qui permettent de déduire l'émissivité à partir d'une méthode réflec-

tométrique. On étudie dans ce chapitre les différents appareils commerciaux, leurs principes de mesure et les biais dus à ces différentes méthodes. Une partie de cette étude est consacrée aux sources d'erreurs possibles des mesures d'émissivité. En dernier lieu, certaines normes concernant les mesures d'émissivité sont étudiées.

Le troisième chapitre est une description de l'émissomètre développé au CERTES et breveté en 2012. On détaille le principe de la mesure, sa constitution et ses propriétés.

Dans le quatrième chapitre nous montrons des exemples d'utilisation de la mesure d'émissivité sur le terrain. La méthode utilisant une sphère intégrante y est détaillée. Pour valider les qualités métrologiques de l'émissomètre EM1, il a fallu caractériser ses performances. Une collaboration avec le LNE (Laboratoire National de Métrologie et d'Essais, Trappes, France) a permis de s'assurer de la justesse des mesures et de quantifier plus finement l'incertitude des mesures fournie avec nos différents dispositifs. Une étude comparative des différentes méthodes de mesure de l'émissivité a permis de mieux appréhender les limites des différents dispositifs. Cette étude a été menée sur des échantillons de natures différentes, choisis pour couvrir l'ensemble des valeurs de l'émissivité et des comportements en réflexion.

On a effectué des mesures d'émissivité sur des bâtiments dans le cadre d'un projet ADEME concernant l'auscultation d'un bâtiment par thermographie passive. Pour permettre d'effectuer des mesures précises de température sur les bâtiments étudiés, nous avons mesuré l'émissivité des surfaces observées par thermographie infrarouge.

Dans le cadre du projet PALM, des mesures sur des échantillons de routes ont été effectuées. Dans cette partie on détaille l'appareillage disponible sur le véhicule THERMO-ROUTE permettant l'auscultation des voies de circulation avec une caméra thermique et une instrumentation adaptée.

Le manuscrit se termine par une conclusion générale reprenant les résultats les plus notables issus de ces travaux ainsi que les grandes lignes des travaux à venir.

Chapitre 1

Contexte général de l'étude

1.1 Rappels sur les transferts thermiques

Les transferts thermiques sont de trois natures différentes : les transferts par conduction, par convection et par rayonnement [1]. Les deux premiers transferts ne peuvent s'effectuer qu'en présence de matière. Les transferts radiatifs peuvent s'effectuer sans support matériel.

1.1.1 Etude d'un système thermique soumis à des échanges de chaleur

Pour illustrer les différents échanges thermiques, on étudie le système thermique présenté sur la figure 1.1. Le premier principe de la thermodynamique nous impose l'égalité des flux produits et entrants à ceux stockés et sortants. Ces grandeurs sont des grandeurs algébriques.

1.1.2 Transfert par conduction

Les transferts par conduction sont régis par les équations de diffusion de la chaleur. Ces transferts reposent sur l'hypothèse de Fourier : le flux thermique est proportionnel au gradient de température. L'équation 1.1 rend compte de cette hypothèse :

$$\overrightarrow{\Phi} = -\lambda \cdot S \cdot \overrightarrow{grad}(T) \tag{1.1}$$

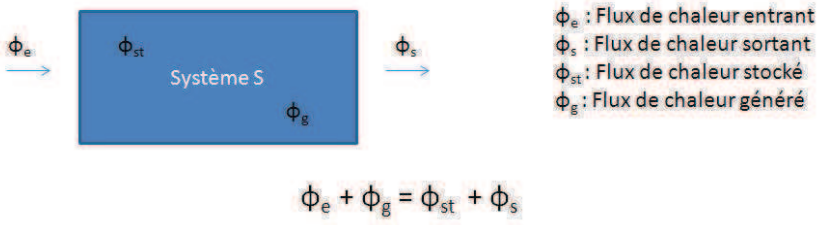


FIGURE 1.1 – Bilan énergétique d'un système thermique en interaction avec l'environnement

Dans l'équation 1.1, λ est la conductivité thermique en W.m^{-1}.K^{-1}, T la température en K, Φ le flux thermique en W et S l'aire en m^2 à travers laquelle on détermine le flux.

1.1.3 Transfert par convection

Les transferts par convection sont les échanges de chaleur entre un solide et un fluide en mouvement. Ces échanges s'effectuent à l'interface des deux milieux. La convection n'est pas régie par des équations déterministes et exactes comme la conduction. Elle laisse une grande part à une détermination empirique des coefficients d'échange de la chaleur. Ceux-ci sont régis par la loi de Newton qui postule que ces échanges sont proportionnels à la surface de l'interface et à la différence de température entre le fluide et le solide (équation 1.2). Le coefficient d'échange par convection h_C s'exprime en W.m^{-2}.K^{-1}, T_{solide} et T_{fluide}en K, S en m^2 et Φ en W.

$$\Phi = h_c \cdot S \cdot (T_{solide} - T_{fluide}) \tag{1.2}$$

Plusieurs modèles existent pour prévoir le coefficient d'échange h_C en fonction des propriétés du fluide, de la rugosité de la surface, de la configuration géométrique, de la vitesse d'écoulement du fluide à proximité de la surface...

Un exemple de calcul empirique de ce coefficient d'échange global pour une convection naturelle est donné dans la norme ISO-6946 (norme concernant l'isolation thermique du bâtiment) par la relation suivante :

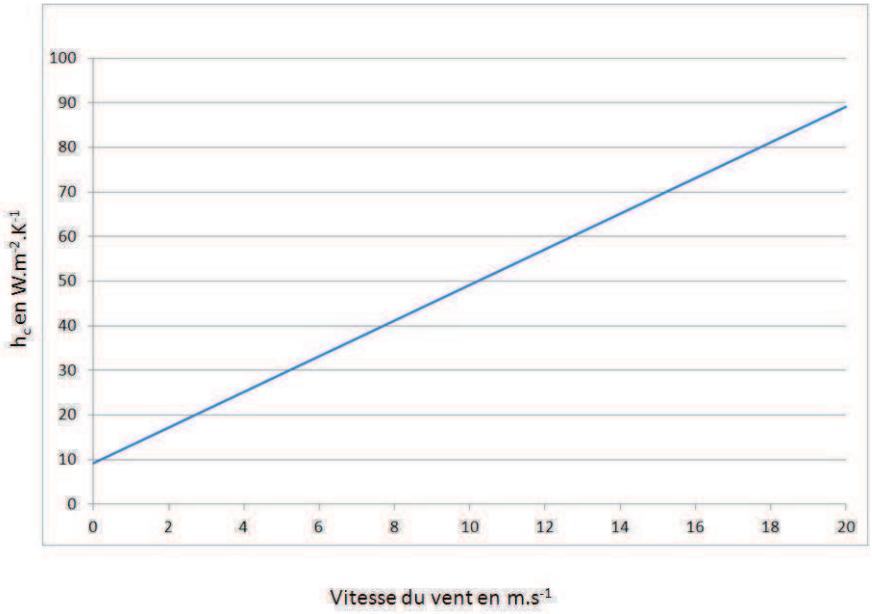


FIGURE 1.2 – h_c en fonction de la vitesse du vent v pour une température de 283 K selon la norme ISO-6946 pour la convection naturelle

$$h_c = 4 \cdot (1 + v + \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_m^3) \tag{1.3}$$

où v est la vitesse du vent en $\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}$ et T_m la température moyenne de l'environnement en K. Celle-ci a peu d'influence sur la valeur de h_c : à température ambiante, h_c augmente de $1\,\mathrm{W.m^{-2}.K^{-1}}$ pour une augmentation de la température de 20 K. A 283 K pour une vitesse de vent de $3\,\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}$ on a $h_C = 21\,\mathrm{W.m^{-2}.K^{-1}}$. La figure 1.2 donne la valeur de h_C en fonction de v. On constate que la vitesse du vent est le paramètre qui influence le plus le coefficient de convection ; la température de l'air ayant une influence marginale. Le terme $\varepsilon \cdot \sigma \cdot T_m^3$ représente la part radiative de ce coefficient d'échange global.

1.1.4 Transfert par rayonnement

Les particules constituant la matière peuvent perdre une partie de leur énergie cinétique sous forme de rayonnement électromagnétique. Inversement ce rayonnement peut être absorbé par la matière. Ce rayonnement est défini par l'équation de Stefan-Boltzmann :

$$M_0(T) = \sigma \cdot T^4 \tag{1.4}$$

avec $\sigma = 5,67.10^{-8}\,\mathrm{W.m^{-2}.K^{-4}}$, la constante de Stefan-Boltzmann

Cette expression est déduite de la connaissance du rayonnement sur l'ensemble du spectre électromagnétique comme nous le verrons au 1.2.1. Pour évaluer les transferts radiatifs entre deux surfaces ou entre une surface et l'environnement, on se réfèrera à [1]. Pour évaluer ces échanges, on prend en compte notamment la géométrie de l'ensemble. Il est habituel de linéariser l'expression 1.4 pour deux surfaces en regard, et de définir un coefficient d'échange radiatif h_R :

$$\Phi = h_R \cdot S \cdot (T_1 - T_2) \tag{1.5}$$

où T_1 et T_2 sont les températures des éléments échangeant de la chaleur. $h_R = 4 \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot T^3$ est le coefficient d'échange radiatif (ε est une propriété de la surface explicitée au §1.2.2). T représente la moyenne des températuresT_1 et T_2. On considère que cette relation s'applique si $|T_1 - T_2| < 100\,\mathrm{K}$ [1]. h_R s'exprime en $\mathrm{W.m^{-2}.K^{-1}}$.

1.1.5 Exemple de cas réel

Pour un cas réel, les trois modes de transfert peuvent exister de manière concomitante. La valeur du coefficient d'échange h entre un fluide et une paroi résulte de la contribution des coefficients d'échange convectif et radiatif, h_C et h_R : $h = h_C + h_R$. Pour illustrer ces différents transferts thermiques, on peut prendre l'exemple d'une paroi isolée d'un bâtiment (figure 1.3). T_{int}, T_{ext}, T_{Sint} et T_{Sext} sont respectivement les températures de l'air à l'intérieur et à l'extérieur, de la surface intérieure du mur et de la surface extérieure du mur. On se place dans le cas d'échanges stationnaires et monodimensionnels. Sur cette figure sont notés les transferts par conduction et par convection. Dans le cas général il conviendrait de prendre en compte l'énergie stockée dans la paroi pour des mesures *in-situ*, car les températures T_{int} et T_{ext} sont variables dans le temps. Pour cet exemple, nous avons choisi de nous placer dans un régime stationnaire. Le flux thermique s'exprime ainsi (equation 1.6) :

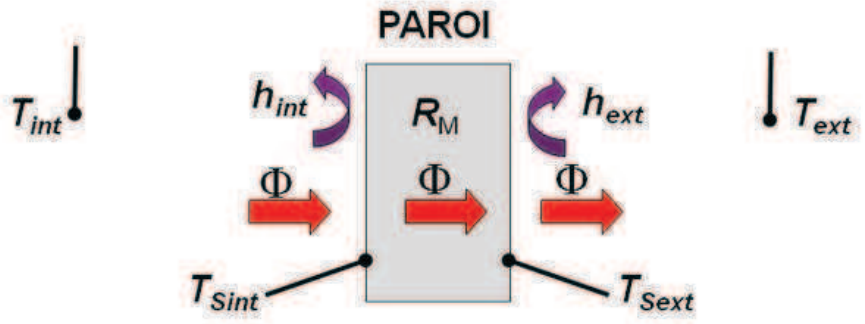


FIGURE 1.3 – Transfert thermique dans le cas d'une paroi de résistance thermique R_M

$$\Phi = \frac{T_{int} - T_{ext}}{\frac{1}{h_{int}} + R_M + \frac{1}{h_{ext}}} \cdot S \tag{1.6}$$

Ce flux peut s'écrire aussi de plusieurs manières (équation 1.7), ce qui permet en mesurant les différentes températures d'évaluer les différents coefficients d'échange et la résistance thermique de la paroi (R_M, h_{int}, h_{ext}).

$$\Phi = \frac{T_{Sint} - T_{Sext}}{R_M} \cdot S = h_{int} \cdot (T_{int} - T_{Sint}) \cdot S = h_{ext} \cdot (T_{Sext} - T_{ext}) \cdot S \tag{1.7}$$

1.2 Les transferts thermiques radiatifs

Comme on a pu le voir précédemment, les transferts thermiques radiatifs s'effectuent par échange de chaleur entre des surfaces en regard. La loi de Planck définit la luminance en fonction de la longueur d'onde et de la température pour un corps théorique appelé corps noir.

1.2.1 Le rayonnement du corps noir

Max Planck a déterminé théoriquement au début du XXeme siècle l'émittance d'un corps idéal appelé corps noir grâce à la théorie quantique. L'expression de cette émittance spectrale notée $M_0(\lambda, T)$ dépend de la température thermodynamique T en K et de la longueur d'onde

λ en m (loi de Planck 1.8) :

$$M_0(\lambda, T) = 2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2 \cdot \frac{1}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{h \cdot c}{k \cdot \lambda \cdot T}} - 1\right)} \tag{1.8}$$

où $h = 6.62617.10^{-34}$ J.s est la constante de Planck, la vitesse de la lumière dans le milieu considéré (on prendra la valeur de c dans le vide : $c = 299792458\,\mathrm{m.s^{-1}}$) et $k = 1.38066.10^{-23}\,\mathrm{J.K^{-1}}$ la constante de Boltzmann. L'émittance s'exprime en $\mathrm{W.m^{-2}}$.

On définit la luminance spectrale L_0 en $\mathrm{W.m^{-3}.sr^{-1}}$ comme étant la puissance rayonnée pour une longueur d'onde et par unité d'angle solide dans une direction donnée. Pour un corps noir, cette luminance ne dépend pas de la direction considérée. On dit que le corps noir obéit à la loi de Lambert. Si l'on intègre la luminance sur un angle solide hémisphérique, on obtient une relation entre la luminance et l'émittance :

$$L_0(\lambda, T) = \frac{M_0(\lambda, T)}{\pi} \tag{1.9}$$

Le corps noir idéal absorbe intégralement toutes les radiations incidentes. Si l'on intègre la totalité du flux émis par un corps noir sur l'ensemble du spectre électromagnétique et pour l'ensemble des rayons émergents, on retrouve l'émittance totale M_0 (équation 1.4).

1.2.2 Rayonnement des corps réels

La loi de Planck ne s'applique pas aux matériaux réels. Ces matériaux diffèrent du corps noir par une émittance inférieure à celle du corps noir. En outre, pour un corps réel, la luminance dépend de la direction sous laquelle on observe ce corps. Ce ne sont généralement pas des corps répondant à la loi de Lambert. La luminance pour un corps réel s'écrit ainsi :

$$L(\lambda, T, \theta, \varphi) = \frac{d^2\phi}{d\Omega.dS.\cos\theta} \tag{1.10}$$

Il faut se référer à la figure 1.4 pour les définitions des différentes notations. Dans notre étude, nous considèrerons que les surfaces ont un comportement radiatif isotrope. La luminance ne

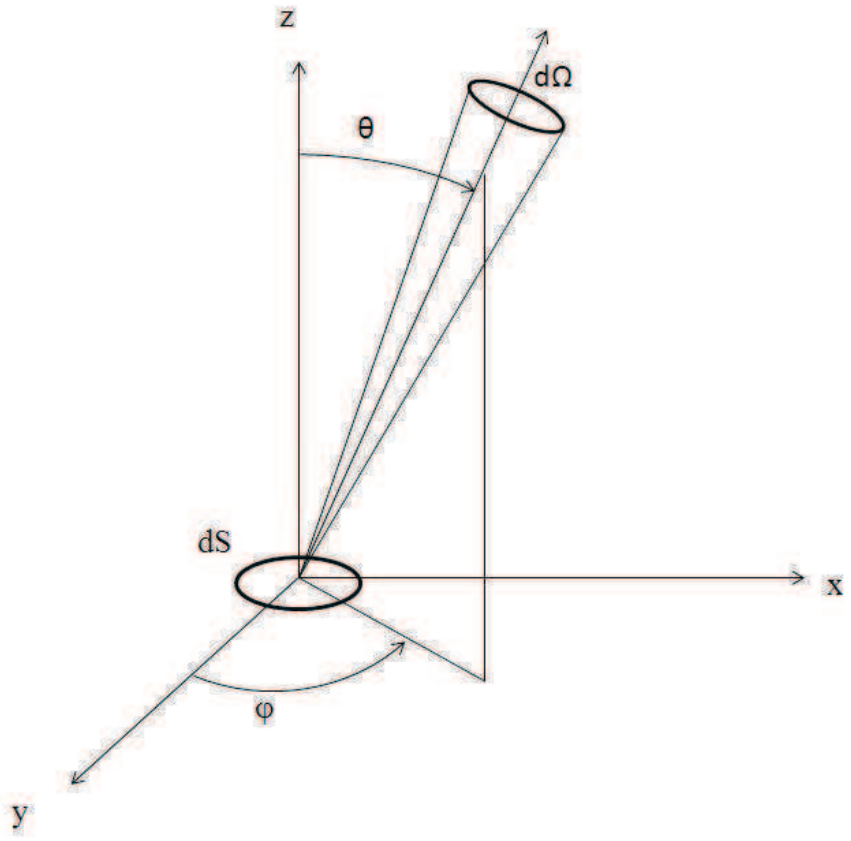


FIGURE 1.4 – Coordonnées sphériques et définition de l'angle solide pour le calcul de la luminance en fonction de la direction

dépendra donc pas de φ.

1.2.3 Les différentes définitions de l'émissivité

On définit de manière générale l'émissivité comme étant le rapport entre l'énergie rayonnée par le corps réel et l'énergie rayonnée par le corps noir dans les mêmes conditions (même température, direction d'observation, longueur d'onde...). L'émissivité ε peut être un rapport d'émittance ou de luminance. L'émissivité est comprise entre 0 et 1.

On classe les émissivités selon les domaines spatial et spectral du rayonnement. On appelle émissivité totale l'émissivité calculée sur l'ensemble du spectre et émissivité monochromatique l'émissivité calculée pour une seule longueur d'onde. On appelle émissivité hémisphérique l'émissivité calculée pour l'ensemble des directions et émissivité directionnelle celle calculée suivant une seule direction.

a. Emissivité monochromatique directionnelle

L'émissivité monochromatique directionnelle notée $\varepsilon_\lambda^{|}$ est le rapport entre la luminance du matériau et celle du corps noir pour une direction et une longueur d'onde données :

$$\varepsilon_\lambda^{|} = \varepsilon(\lambda, T, \theta, \varphi) = \frac{L_{Materiau}(\lambda, T, \theta, \varphi)}{L_0(\lambda, T, \theta, \varphi)} \tag{1.11}$$

b. Emissivité monochromatique hémisphérique

L'émissivité monochromatique hémisphérique notée $\varepsilon_\lambda^{\cap}$ est le rapport entre l'émittance hémisphérique du matériau et celle du corps noir pour une longueur d'onde donnée :

$$\varepsilon_\lambda^{\cap} = \varepsilon(\lambda, T) = \frac{\int L_{Materiau}(\lambda, T, \theta, \varphi)\,\mathrm{d}\theta\,\mathrm{d}\varphi\,\mathrm{d}\Omega}{\int L_0(\lambda, T, \theta, \varphi)\,\mathrm{d}\theta\,\mathrm{d}\varphi\,\mathrm{d}\Omega} \tag{1.12}$$

c. Emissivité totale directionnelle

L'émissivité totale directionnelle notée $\varepsilon^{|}$ est le rapport entre la luminance dans une direction particulière du matériau et celle du corps noir pour l'ensemble des longueurs d'ondes :

$$\varepsilon^{|} = \varepsilon(T, \theta, \varphi) = \frac{\int_0^\infty L_{Materiau}(\lambda, T, \theta, \varphi)\,\mathrm{d}\lambda}{\int_0^\infty L_0(\lambda, T, \theta, \varphi)\,\mathrm{d}\lambda} \tag{1.13}$$

Cette valeur de l'émissivité intéresse les utilisateurs de caméras thermiques. En effet, elle permet de relier la luminance dans une direction avec la température. Ce calcul ou cette mesure d'émissivité peut se faire dans une bande de longueur d'onde identique à celle de la caméra :

$$\varepsilon^{|} = \varepsilon(T, \theta, \varphi) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{Materiau}(\lambda, T, \theta, \varphi)\,\mathrm{d}\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_0(\lambda, T, \theta, \varphi)\,\mathrm{d}\lambda} \tag{1.14}$$

d. Emissivité totale hémisphérique

L'émissivité totale hémisphérique notée ε est le rapport entre l'émittance totale hémisphérique du matériau et celle du corps noir pour l'ensemble des longueurs d'ondes :

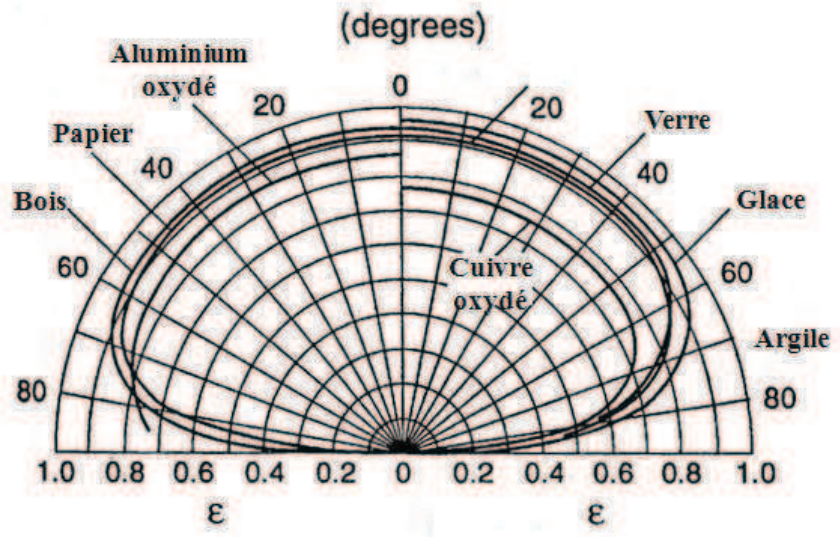


FIGURE 1.5 – Emissivité totale directionnelle en fonction de la direction. D'après X.P. Maldague "Theory and practice of infrared technology for non destructive testing" [2]

$$\varepsilon = \frac{\int L_{Materiau}(\lambda, T, \theta, \varphi)\, \mathrm{d}\lambda\, \mathrm{d}\theta\, \mathrm{d}\varphi\, \mathrm{d}\Omega}{\int L_0(\lambda, T, \theta, \varphi)\, \mathrm{d}\lambda\, \mathrm{d}\theta\, \mathrm{d}\varphi\, \mathrm{d}\Omega} \tag{1.15}$$

C'est cette émissivité qui intéresse les thermiciens pour effectuer des bilans thermiques de parois opaques.

1.2.4 Quelques cas particuliers

Si l'émissivité d'un matériau ne dépend pas de la longueur d'onde, on qualifie celui-ci de corps gris. Cette propriété ne se rencontre pas dans la réalité et on qualifiera de corps gris, un corps pour lequel l'émissivité ne varie pas dans le domaine spectral étudié.

Comme nous venons de le voir, l'émissivité d'un matériau réel dépend généralement aussi de l'angle d'émission. Ce n'est donc pas une surface lambertienne. Pour les diélectriques cependant, l'émissivité varie peu dans une large plage angulaire (de 0 à 60°). Dans ce domaine angulaire, ils sont considérés comme lambertiens. La figure 1.5 d'après [2] représente l'émissivité totale directionnelle en fonction de l'angle pour un certain nombre de matériaux. On peut constater que celle-ci ne varie pas jusqu'à un angle de 60°. En outre, la loi de variation de l'émissivité en fonction de l'angle montre une similitude de forme.

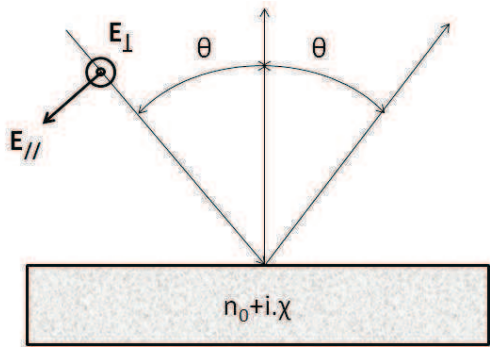


FIGURE 1.6 – Réflexion spéculaire sur un dioptre plan : présentation des grandeurs géométriques

1.2.5 Calcul de l'émissivité d'un matériau à partir de son indice complexe

On peut relier l'émissivité directionnelle au coefficient de réflexion directionnel hémisphérique grâce à la loi de Kirchhoff. Pour le dioptre plan, on peut calculer l'émissivité à partir de l'expression des coefficients de réflexion, calculés à partir de l'indice complexe, $n = n_0 + i \cdot \chi$. On peut retrouver ce calcul détaillé dans [11] à partir des équations de Maxwell. Ces expressions sont déduites des coefficients de Fresnel pour la réflexion, on peut les trouver dans [8]. Les expressions 1.16 et 1.17 peuvent être utilisées avec les indices complexes ce qui permet de les utiliser pour le calcul de l'émissivité des métaux. Les expressions issues de [4], présentent l'avantage d'être plus faciles à manipuler, cependant les expressions des coefficients de Fresnel sont fausse, seule l'expression de l'émissivité pour l'incidence normale est correcte. Des considérations de conditions aux limites au niveau du dioptre imposent de calculer un coefficient de réflexion et donc d'émissivité pour deux polarisations distinctes. Ces polarisations sont explicitées sur le schéma de la figure 1.6. Pour une lumière non polarisée, on doit effectuer la moyenne arithmétique des deux émissivités correspondant aux deux polarisations. Les calculs sont présentés ci-dessous :

$$\varepsilon_{//} = 1 - \frac{\left(n \cdot \cos(\theta) - \sqrt{1 - \frac{\sin(\theta)^2}{n^2}}\right) \cdot \overline{\left(n \cdot \cos(\theta) - \sqrt{1 - \frac{\sin(\theta)^2}{n^2}}\right)}}{\left(n \cdot \cos(\theta) + \sqrt{1 - \frac{\sin(\theta)^2}{n^2}}\right) \cdot \overline{\left(n \cdot \cos(\theta) + \sqrt{1 - \frac{\sin(\theta)^2}{n^2}}\right)}} \tag{1.16}$$

$$\varepsilon_{\perp} = 1 - \frac{\left(\cos(\theta) - n \cdot \sqrt{1 - \frac{\sin(\theta)^2}{n^2}}\right) \cdot \overline{\left(\cos(\theta) - n \cdot \sqrt{1 - \frac{\sin(\theta)^2}{n^2}}\right)}}{\left(\cos(\theta) + n \cdot \sqrt{1 - \frac{\sin(\theta)^2}{n^2}}\right) \cdot \overline{\left(\cos(\theta) + n \cdot \sqrt{1 - \frac{\sin(\theta)^2}{n^2}}\right)}} \tag{1.17}$$

On peut aussi calculer l'émissivité directionnelle normale, dans ce cas les deux polarisations sont équivalentes :

$$\varepsilon_n = \frac{4 \cdot n_0}{(n_0 + 1)^2 + \chi^2} \tag{1.18}$$

a. Cas des diélectriques

On trace l'émissivité en fonction de l'angle, connaissant les caractéristiques du diélectrique (sa permitivité diélectrique et sa perméabilité magnétique) pour un dioptre air/diélectrique. La figure 1.7 issue de [11] montre l'émissivité directionnelle en fonction de l'angle pour un diélectrique ayant un indice de réfraction de 1.5 : cela correspond à une permitivité diélectrique relative de 2.25. Ce sont typiquement les caractéristiques d'un verre à base de boro-silicates. On constate que l'on retrouve la même forme d'indicatrice d'émissivité par la théorie que celles mesurées expérimentalement (figure 1.5 issu de [2]). Puisque le seul paramètre pouvant faire varier l'émissivité d'un dioptre diélectrique lisse est l'indice de réfraction, pour un indice de réfraction donné, on aura toujours la même indicatrice d'émissivité. De ce fait, on peut calculer par intégration sur l'ensemble de l'hémisphère l'émissivité hémisphérique. Le rapport entre l'émissivité hémisphérique et l'émissivité directionnelle normale n'est donc fonction que de l'indice de réfraction, et donc seulement de l'émissivité directionnelle normale (graphique 1.8 issu de [11]). On pourra donc déduire l'émissivité hémisphérique de l'émissivité directionnelle normale, et inversement. Ces rapports sont tabulés dans la norme NF EN 12898 concernant la détermination de l'émissivité pour le verre de construction. Cette étude peut être utilisée pour un diélectrique non lisse avec une bonne approximation. En effet, le caractère rugueux n'affecte que très peu l'indicatrice d'émissivité d'un diélectrique.

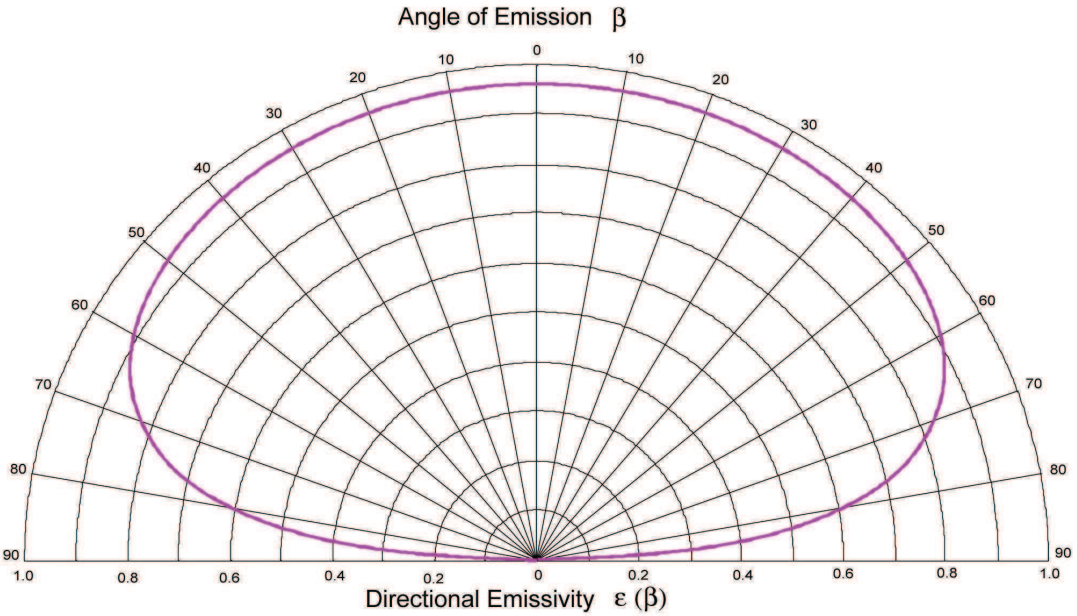


FIGURE 1.7 – Emissivité directionnelle en fonction de l'angle pour un diélectrique d'indice de 1.5, d'après L. Kauder, Spacecraft Thermal Control Coatings References, NASA/Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, NASA [11]

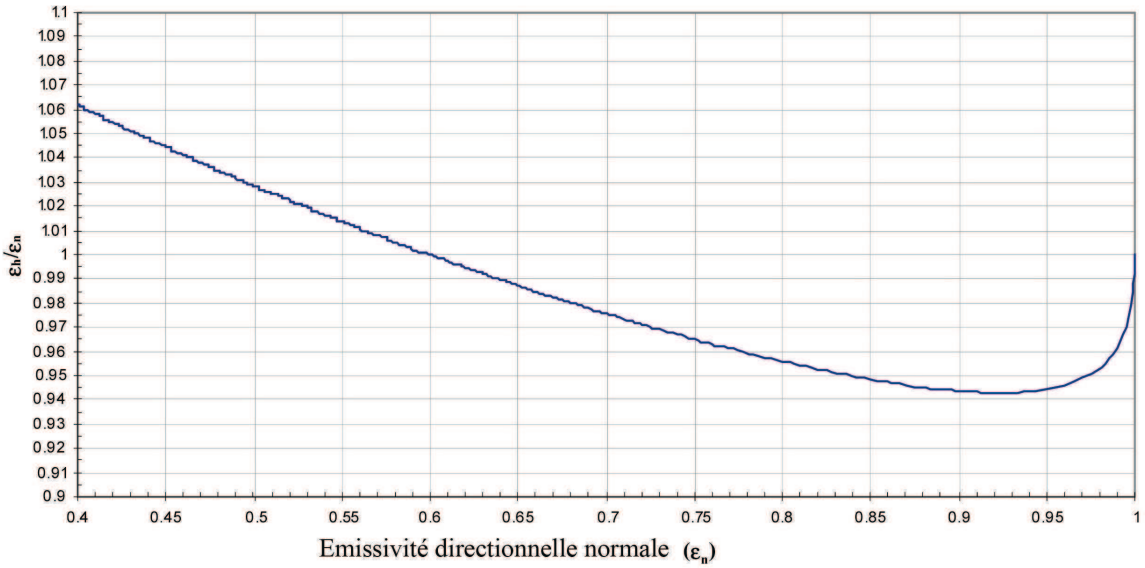


FIGURE 1.8 – Rapport entre l'émissivité hémisphérique et l'émissivité directionnelle normale en fonction de l'émissivité directionnelle normale pour les diélectriques lisses, d'après L. Kauder, Spacecraft Thermal Control Coatings References, NASA/Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, NASA/TP [11]

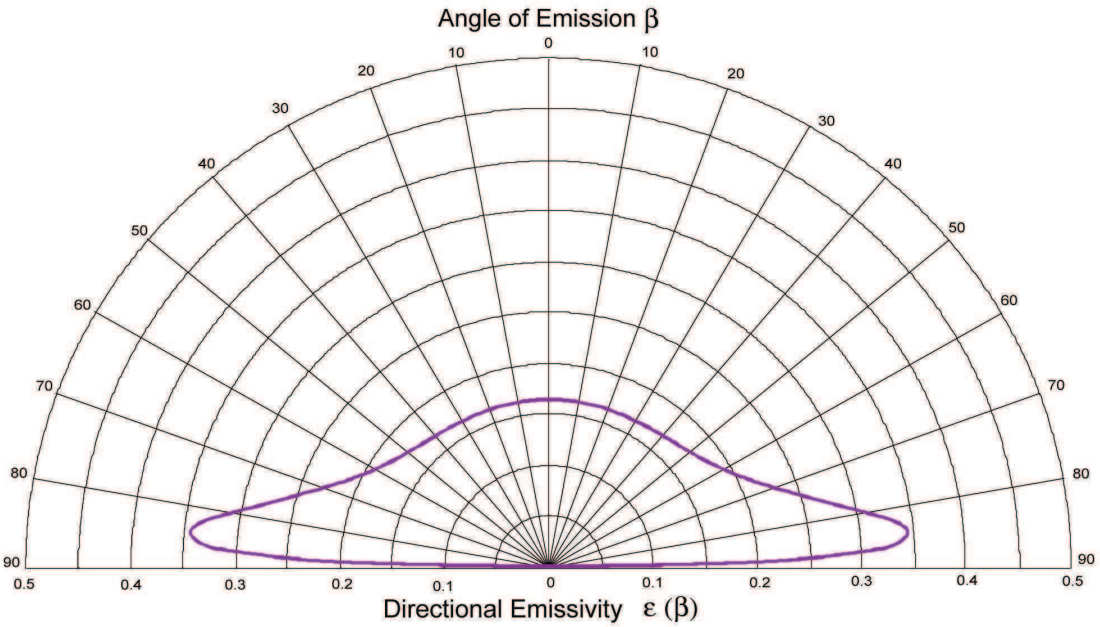


FIGURE 1.9 – Emissivité directionnelle en fonction de l'angle pour un métal ayant pour indice de réfraction : $n = 5.7 + 9.7 \cdot i$, d'après L. Kauder, Spacecraft Thermal Control Coatings References, NASA/Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, NASA [11]

b. Cas des métaux

De la même manière, on peut tracer l'indicatrice d'émissivité pour un dioptre air/métal. On obtient une indicatrice d'émissivité théorique similaire à ce que l'on peut obtenir sur un métal comme l'aluminium. Celle représentée figure 1.9 issue de [11] est calculée pour un indice de réfraction typique d'un métal tel que l'aluminium : $n = 5.7 + 9.7i$. La correspondance entre l'émissivité hémisphérique et l'émissivité directionnelle normale existe aussi pour les conducteurs, cependant l'indicatrice d'émissivité est différente. Il faut donc traiter les conducteurs séparément des diélectriques pour déterminer le rapport entre les deux émissivités. Le graphique de la figure 1.10 issu de [11] montre la correspondance entre celles-ci. Cette étude ne peut être utilisée pour un conducteur non lisse. En effet le caractère rugueux affecte fortement l'indicatrice d'émissivité d'un métal car l'émissivité d'un métal varie beaucoup avec la rugosité de celui-ci. On se réfèrera à [30] pour une étude plus détaillée de l'émissivité des métaux en fonction de la rugosité.

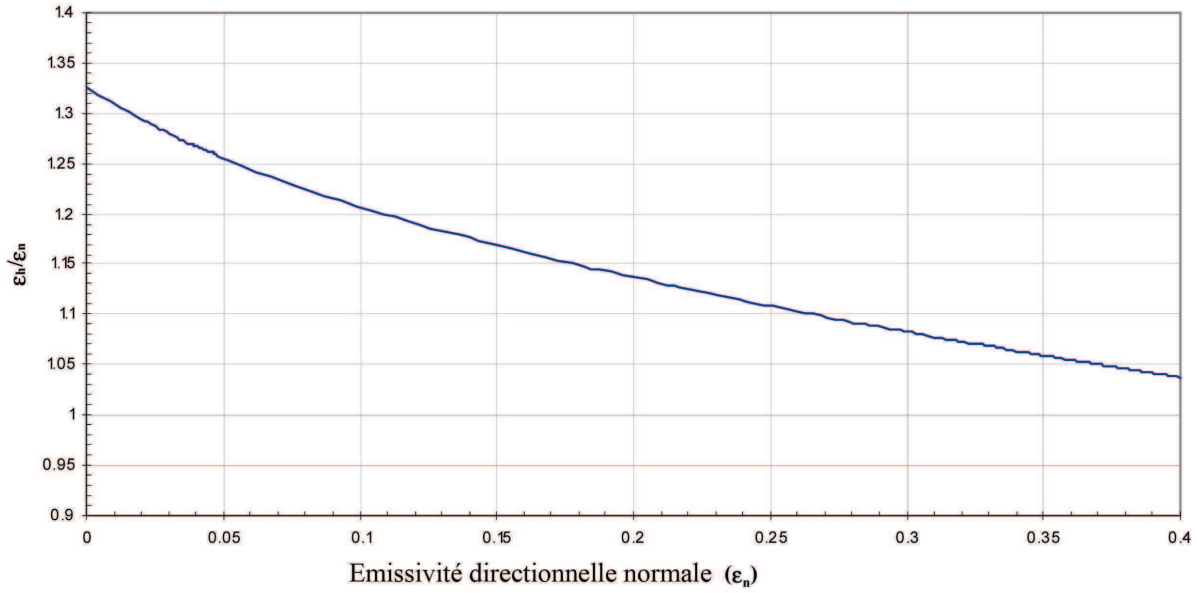


FIGURE 1.10 – Rapport entre l'émissivité hémisphérique et l'émissivité directionnelle normale en fonction de l'émissivité directionnelle normale pour les conducteurs lisses, d'après L. Kauder, Spacecraft Thermal Control Coatings References, NASA/Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, NASA [11]

1.3 Calcul des transferts thermiques radiatifs

Les transferts radiatifs entre deux surfaces peuvent se concevoir comme un problème de photométrie. On s'intéressera dans un premier temps à deux surfaces d'émissivités égales à 1. Il faut intégrer l'ensemble des rayons lumineux partant de la surface émettant le rayonnement (indice 1) vers la surface cible (indice 2). Le flux élémentaire s'écrit :

$$d^2\Phi_{12} = M_1^0 \cdot \frac{dS_1 \cdot \cos(\theta_1) \cdot dS_2 \cdot \cos(\theta_2)}{\pi \cdot l^2} \tag{1.19}$$

l étant la distance séparant dS_1 de dS_2. Le flux total s'écrit donc :

$$\Phi_{12} = M_1^0 \cdot S_1 \cdot \frac{1}{S_1} \cdot \int_{S_1} \int_{S_2} \frac{dS_1 \cdot \cos(\theta_1) \cdot dS_2 \cdot \cos(\theta_2)}{\pi \cdot l^2} \tag{1.20}$$

Cela permet de faire apparaître le facteur de forme qui est une grandeur purement géométrique :

$$F_{12} = \frac{1}{S_1} \cdot \int_{S_1} \int_{S_2} \frac{dS_1 \cdot \cos(\theta_1) \cdot dS_2 \cdot \cos(\theta_2)}{\pi \cdot l^2} \tag{1.21}$$

On peut écrire le flux de 1 vers 2 :

$$\Phi_{12} = M_1^0 \cdot S_1 \cdot F_{12} \tag{1.22}$$

Le flux de 2 vers 1 s'écrit donc :

$$\Phi_{21} = M_2^0 \cdot S_2 \cdot F_{21} \tag{1.23}$$

On remarquera que :

$$F_{12} = \frac{S_2}{S_1} \cdot F_{21} \tag{1.24}$$

On calculera donc le facteur de forme le plus simple des deux à déterminer. Dans le cas de surface en intéraction totale (par exemple, deux surfaces carrées très grandes en regard l'une de l'autre à une distance très petite par rapport aux côtés de ces surfaces), le facteur de forme est égal à 1.

Des abaques existent dans [1] pour calculer le facteur de forme dans diverses configurations géométriques.

Dans le cas de surfaces grises, on peut donc aisément écrire le bilan du transfert thermique entre les deux surfaces :

$$\Phi_{net} = \frac{\sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1 \cdot S_1} + \frac{1}{S_1 \cdot F_{12}} + \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2 \cdot S_2}} \tag{1.25}$$

Le dénominateur sans dimension peut être considéré comme un facteur de forme gris englobant la géométrie et les propriétes de surface des matériaux en interaction.

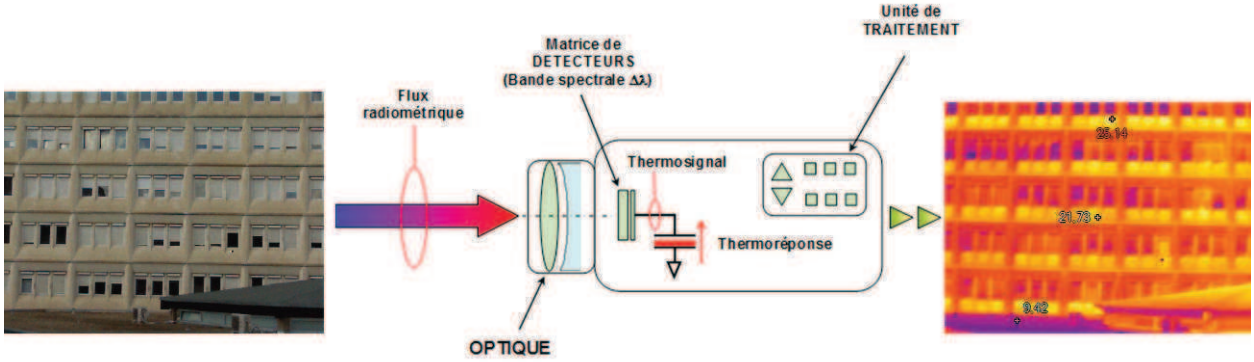


FIGURE 1.11 – Shéma de principe du fonctionnement d'une caméra thermique

1.4 La thermographie infrarouge comme moyen d'investigation pour le diagnostic quantitatif des structures

1.4.1 Les mesures par thermographie infrarouge : généralités

a. Les caméras thermiques

Le principe de fonctionnement des caméras thermiques est généralement calqué sur le modèle de la figure 1.11.

Plusieurs types de détecteurs sont utilisés sous forme de matrices permettant d'obtenir une image. On classe généralement les détecteurs en deux catégories : les détecteurs quantiques et les détecteurs bolométriques.

Les premiers sont sensibles à la quantité de photons reçus et le signal qu'ils fournissent est proportionnel à ce nombre. Ils ne peuvent être utilisés que refroidis. Ils sont mis dans un cryostat refroidi généralement par une machine thermique du type Stirling. Ce type de détecteur peut mesurer des variations de températures de l'ordre de quelques mK. Ils sont peu sensibles au bruit. Une des caméras utilisées au CERTES est de ce type, la SC-7000 de FLIR© représentée figure 1.12.

Les seconds mesurent l'échauffement dû au rayonnement reçu par chaque bolomètre. Un

FIGURE 1.12 – Caméras FLIR©

FIGURE 1.13 – Caméra FLUKE© TI-32

bolomètre est un dispositif qui convertit le rayonnement en élévation de température. Il peut fonctionner à température ambiante. Leur sensibilité est moindre. A ce jour, ils peuvent détecter des différences de température de l'ordre de 40 mK. Une des caméras utilisées au CERTES utilise ce type de détecteur, la FLUKE© TI-32 représentée figure 1.13. Il existe également des caméras de ce type avec une interfaçe Ethernet d'une dizaine de centimètres comme la caméra AX5 de FLIR© représentée figure 1.12. L'avantage des détecteurs bolométriques est de pouvoir être utilisés sans dispositif de refroidissement. Le faible coût de ces détecteurs comparé aux détecteurs quantiques (ainsi que l'absence de système de refroidissement) a permis de généraliser l'utilisation de ces caméras pour le diagnostic thermique.

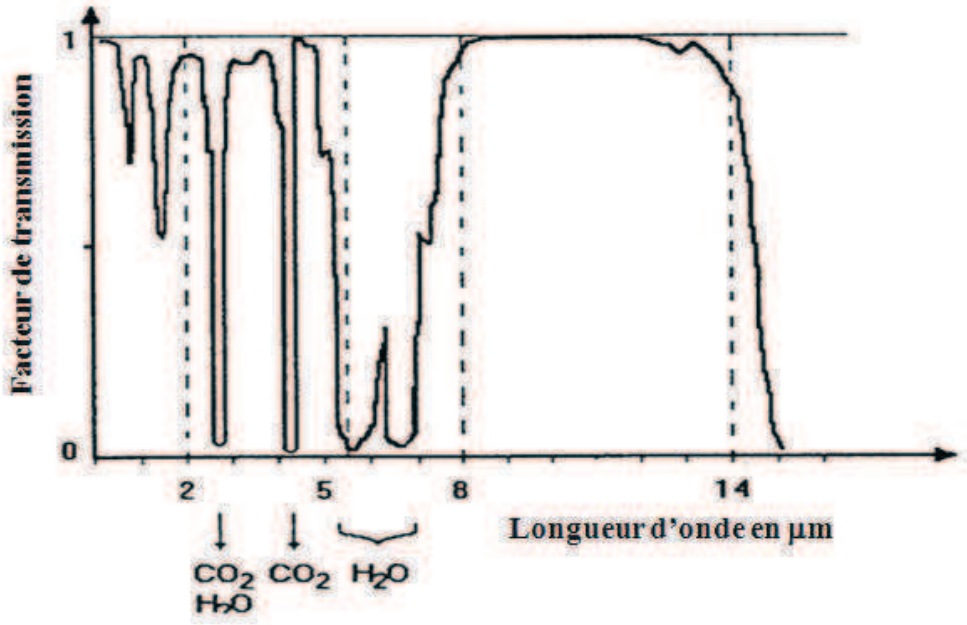


FIGURE 1.14 – Variation de la transmission de l'atmosphère en fonction de la longueur d'onde d'après [6]

b. Bande spectrale utilisée par les caméras thermiques

Nous n'étudierons pas les caméras thermographiques travaillant dans le domaine des ultra-violets. Ce domaine spectral offre peu d'intérêt pour la thermographie à température ambiante, objet de notre étude. En effet, le rayonnement UV est excessivement faible dans ce domaine de température. Ce domaine spectral est réservé aux températures élevées où il présente l'avantage d'un très faible bruit.

La bande spectrale des caméras thermiques prend en compte les bandes de transparence de l'atmosphère (figure 1.14 issu de [6]). En effet, il est impératif d'être le moins sensible possible à l'épaisseur d'atmosphère traversée. Sur la figure 1.14, deux bandes spectrales se distinguent : 2 à 5 μm et 7 à 14 μm. La première bande spectrale est celle des caméras dites à ondes moyenne, la seconde est celle des caméras dites à ondes longues (en référence à la longueur d'onde). Cette deuxième bande est appelée bande III. La technologie s'est ensuite développée pour obtenir un maximum de sensibilité dans ces deux domaines spectraux.

1.4.2 Mesure de température d'une surface par thermographie

La mesure de température peut s'effectuer par mesure de luminance dans le domaine infrarouge. Un dispositif de mesure de température sans contact par balayage [53] est un exemple de mesure utilisant ce principe. Les caméras thermiques utilise la même méthode de mesure.

Comme on a pu le voir au 1.2.1, la luminance d'un corps noir prend la forme :

$$L_0(T) = \frac{M_0(T)}{\pi} = \frac{\sigma \cdot T^4}{\pi} \tag{1.26}$$

Pour un corps réel, cette valeur est pondérée par l'émissivité. L'équation 1.26 n'est cependant pas appliquable pour les caméras thermiques pour lesquelles on utilise seulement une partie de la bande spectrale. Pour cette partie, on considèrera en outre que les surfaces mesurées dans la bande de longueur d'ondes de sensibilité de la caméra se comportent comme des corps gris, donc que l'émisivité ne varie pas en fonction de la longueur d'onde et de la température (pour des variations faibles de celle-ci). La luminance d'une surface d'émissivité ε peut donc s'écrire :

$$L(T) = \frac{\varepsilon \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_0(\lambda, T) d\lambda}{\pi} \tag{1.27}$$

On peut effectuer ce calcul numériquement. On constate que les variations de la luminance d'un corps gris dans la bande III et pour des températures comprises entre 300 K et 360 K peut s'écrire avec une bonne approximation :

$$L(T) = \frac{\varepsilon \cdot \sigma' \cdot T^4}{\pi} \tag{1.28}$$

où $\sigma' = 2.078.10^{-8}\,\mathrm{W.m^{-2}.K^{-4}}$ pour un calcul entre 8 à 14 μm. A la différence de l'équation 1.26 qui est exacte littéralement, l'équation 1.28 n'est qu'une approximation obtenue par régression en T^4. La figure 1.15 montre l'émittance intégrée entre 8 à 14 μm et cette

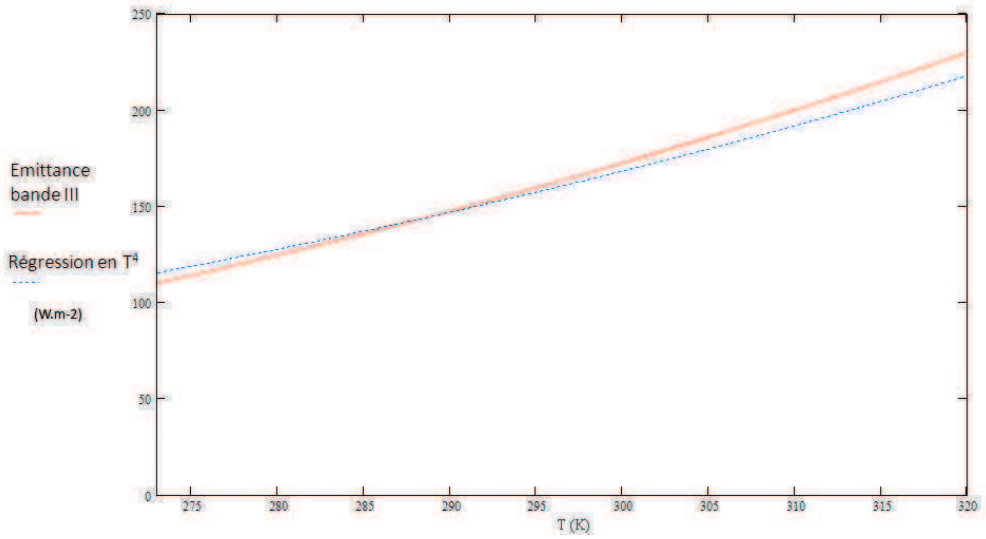


FIGURE 1.15 – Emittance dans la bande III en $\mathrm{W} \cdot \mathrm{m}^{-2}$ et sa régression en T^4 en fonction de la température en K

régression. D'autres régressions plus précises existent ([5]) :

$$L(T) = \frac{A}{e^{\frac{B}{T}} - 1} \tag{1.29}$$

L'équation 1.28 permet d'évaluer les facteurs d'influence de la mesure de température en utilisant les mêmes équations que sur le spectre total avec une bonne approximation. L'écart sur la dérivée de cette expression d'émittance est de 14%. Bien que les bolomètres possèdent une reponse spectrale variant peu en fonction de la longueur d'onde, en toute rigueur il faudrait prendre en compte la réponse spectrale de la caméra dans son intégralité. L'équation 1.28 ne sera donc utilisée dans cette étude que pour évaluer les biais introduits par les autres éléments. Les fabricants de caméra intègrent dans leur code de calcul les propriétés des caméras.

Nous allons étudier les éléments de flux intervenant dans la mesure. Pour déterminer une température de surface, la figure 1.16 montre qu'il faut connaitre l'émissivité, l'absorption atmosphérique et la température de l'environnement radiatif. On peut négliger ces paramètres si le but est d'effectuer un diagnostic qualitatif comme la mise en évidence de ponts thermiques (figure 1.17).

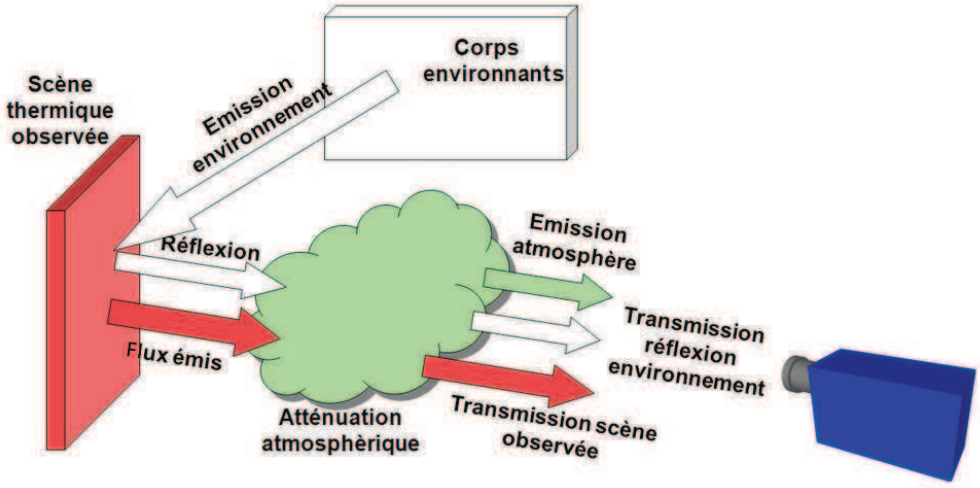


FIGURE 1.16 – Schéma de l'observation d'une scène thermique par thermographie IR

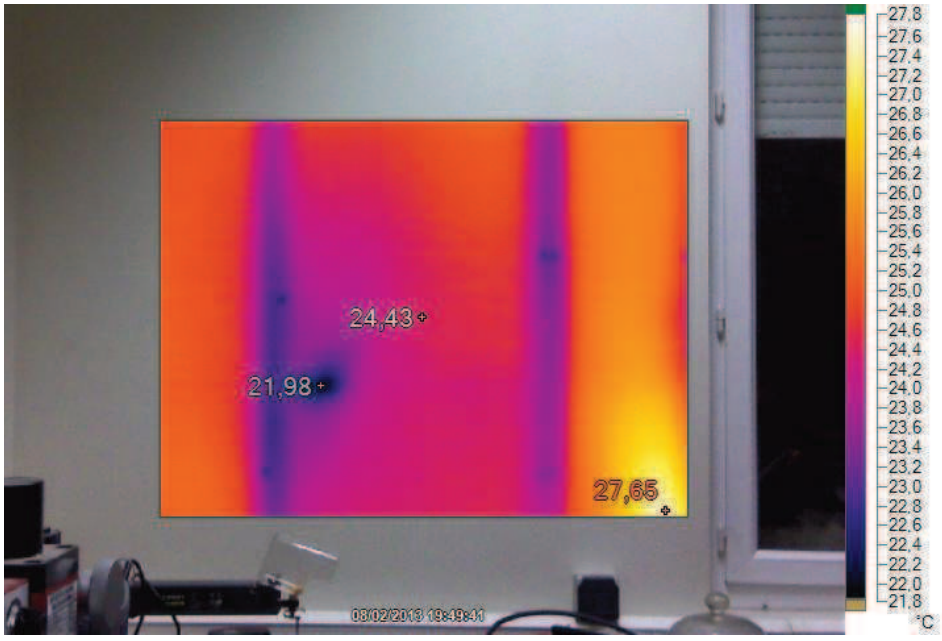


FIGURE 1.17 – Exemple d'image thermique montrant des ponts thermiques dus à des rails de pose de plaques de plâtre

Cependant, il est souvent nécessaire de remonter à la valeur de la température pour estimer les flux thermiques par exemple. Pour cela, il est nécessaire de corriger les images en luminance pour obtenir une cartographie en température de l'objet observé. A partir de la mesure de la luminance, on peut s'affranchir des éléments perturbants pour déterminer la mesure de température. La relation liant la luminance de la scène avec les différentes sources de rayonnement permet d'estimer certains paramètres. Cette relation issue du schéma de la figure 1.16 s'écrit ainsi :

$$L_{mesure}(T) = \tau \cdot \varepsilon \cdot L_0(T) + \tau \cdot (1-\varepsilon) \cdot L_0(T_{env}) + (1-\tau) \cdot L_0(T_{atm}) \tag{1.30}$$

où $L_{mesure}(T)$ est la luminance mesurée par la caméra, τ le coefficient de transmission de l'atmosphère, ε l'émissivité de la surface mesurée, $L_0(T)$ la luminance du corps noir à la température T, T_{env} la température de l'environnement et T_{atm} la température de l'atmosphère traversée. L'émissivité doit être connue, soit en utilisant des données de la littérature, soit en la mesurant. Il est difficile de déterminer une température d'environnement radiatif. On préfère généralement utiliser la méthode décrite dans la norme ASTM E1862-97 qui propose une solution consistant à estimer le rayonnement reçu par la paroi à étudier en plaçant un miroir diffusant dans le champ de la caméra à l'emplacement de la paroi. Ce miroir peut être obtenu en froissant une feuille de papier aluminium et en la défroissant (figure 1.18). Il faut cependant s'assurer que l'émissivité de ce miroir soit assez faible, et que le niveau de rayonnement ambiant soit assez important. Dans le cas contraire, il est nécessaire de connaître la température de ce miroir diffusant pour séparer le flux propre du miroir du flux reçu et réfléchi par celui-ci.

A partir de l'hygrométrie et de la distance entre la caméra et l'objet visé, on peut en déduire le coefficient de transmission de l'atmosphère τ. Il faut par ailleurs connaître la température de l'air. On introduit l'ensemble de ces paramètres dans le code de calcul de la température de surface. Les données existantes donnent une transmission atmosphérique qui peut s'écrire sous la forme :

FIGURE 1.18 – Miroir d'aluminium diffusant selon la norme ASTM E1862-97

$$\tau = e^{-\beta \cdot x} \tag{1.31}$$

où β est le coefficient d'extinction en m^{-1} et x la distance en m. La valeur de β peut se déduire de la figure 1.19 pour une atmosphère ayant une hygrométrie de 50%. Cette valeur dépend de la bande spectrale ; on donnera pour la bande 3 à 5.5 μm et pour la bande 8 à 12 μm : $\beta_{3-5.5} = 3.42 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{m}^{-1}$ $\beta_{8-12} = 6.72 \cdot 10^{-4}\,\mathrm{m}^{-1}$ [5].

Nous allons présenter trois cas d'étude en séparant les sources d'erreurs. Nous avons choisi le cas d'une caméra travaillant en ondes longues c'est-à-dire dans la bande spectrale 8 à 14 μm. Ces caméras sont les plus utilisées dans le domaine du bâtiment. Dans ce cas, la luminance du corps noir calculée entre 8 à 14 μm est approchée par la relation 1.28. On introduit cette relation dans l'équation 1.30. $L_0(T)$ est remplacée par $L(T)$:

$$L_{mesure}(T) = \left(\tau \cdot \varepsilon \cdot \sigma' \cdot T^4 + \tau \cdot (1-\varepsilon) \cdot \sigma' \cdot T_{env}^4 + (1-\tau) \cdot \sigma' \cdot T_{atm}^4\right) \cdot \frac{1}{\pi} \tag{1.32}$$

On en déduit l'expression de la température de la surface mesurée T en fonction de l'ensemble des paramètres :

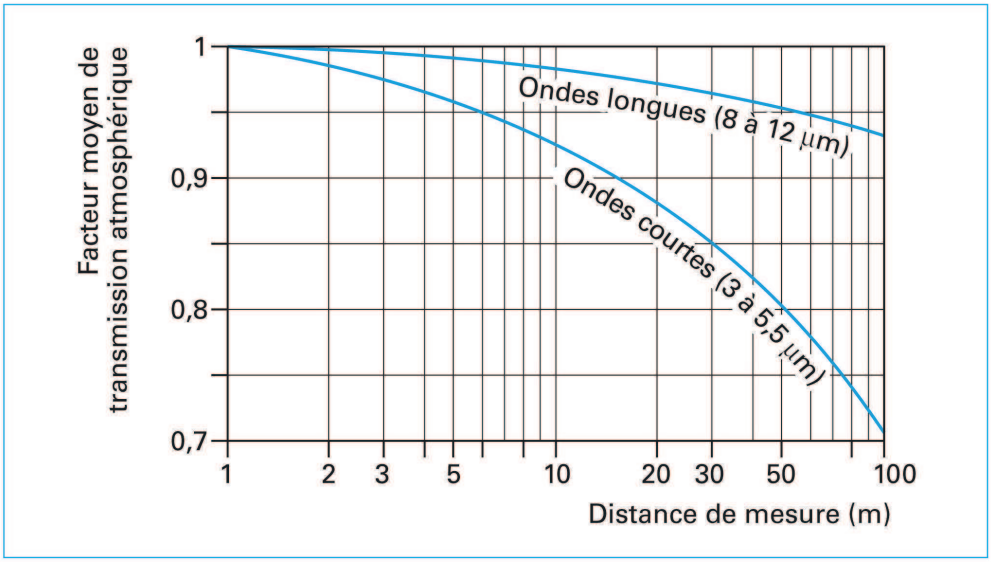


FIGURE 1.19 – Courbes typiques du facteur moyen de transmission de l'atmosphère en fonction de la distance de mesure, pour une atmosphère à 50% d'humidité relative, daprès 'Thermographie Principes et Mesures', Technique de l'ingénieur, D. Pajani [5]

$$T = \left(\frac{L_{mesure}(T) \cdot \pi}{\tau \cdot \varepsilon \cdot \sigma'} - \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \cdot T_{env}^4 - \frac{1-\tau}{\tau \cdot \varepsilon} \cdot T_{atm}^4 \right)^{\frac{1}{4}} \tag{1.33}$$

1.4.3 Erreur de mesure de la température due à l'erreur sur l'émissivité

On considère dans ce calcul le cas le plus défavorable, c'est-à-dire une contribution négligeable de l'environnement radiatif. En outre, on se place dans le cas où la caméra est suffisamment proche de la surface mesurée pour négliger la transmission de l'atmosphère. Dans ce cas, la luminance de la paroi est $L = \sigma' \cdot T^4$. On obtient après simplification : $dT = \frac{T}{4} \cdot \frac{d\varepsilon}{\varepsilon}$. Pour une température de 300 K, on a donc une erreur de 0.75 K pour une erreur de 1% sur l'émissivité. Etant donné que cette erreur ne dépend pas de la valeur de σ' calculée en fonction de la bande spectrale, on peut démontrer que cette erreur est la même en ondes moyennes.

1.4.4 Erreur de mesure de la température due à l'erreur sur la température d'environnement

En dérivant l'expression de T (1.33) par rapport à T_{env} on obtient :

$$\frac{dT}{dT_{env}} = \left(\frac{T_{env}}{T}\right)^3 \cdot \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} \tag{1.34}$$

et par la suite :

$$dT = \left(\frac{T_{env}}{T}\right)^3 \cdot \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} \cdot dT_{env} \tag{1.35}$$

Un exemple numérique permet de se faire une idée de l'erreur : pour une température d'environnement sensiblement égale à la température de la surface à mesurer, et pour une émissivité de cette surface égale à 0.91, une erreur de 10 K sur la mesure de la température d'environnement produit une erreur de 1 K sur la température mesurée.

1.4.5 Erreur de mesure de la température due à la négligence de la transmission atmosphérique

A partir de l'équation 1.33, et si la contribution de l'atmosphère est négligeable (température de l'atmosphère beaucoup plus basse que la température de la paroi mesurée), on peut négliger les deux derniers termes de la racine quatrième de cette équation. On obtient une relation simplifiée pour T :

$$T = \left(\frac{L_{mesure}(T) \cdot \pi}{\tau \cdot \varepsilon \cdot \sigma'}\right)^{\frac{1}{4}} \tag{1.36}$$

Après dérivation par rapport à τ on obtient :

$$dT = -\frac{1}{4} \cdot T \cdot \frac{d\tau}{\tau} \tag{1.37}$$

Pour une caméra travaillant en ondes longues le coefficient de transmission de l'atmo-

Source de l'erreur	erreur commise sur la température
1% d'erreur sur l'émissivité	0.75 K
erreur de 10 K sur la température d'environnement	1 K
Négligence de la transmission de 10 m d'atmosphère dans la bande III	1.5 K
Négligence de la transmission de 10 m d'atmosphère dans la bande 3 à 5 μm	5.6 K

TABLE 1.1 – Exemple d'erreurs de mesure possibles pour des mesures de température à partir de la luminance mesurée avec une caméra thermique.

sphère (figure 1.19) est de 0.98 pour 10 m traversés. On mesure une température de surface de 1.5 K inférieure à la réalité si l'on néglige la prise en compte de la transmission (en prenant $\tau = 1$) . Un calcul identique en ondes moyenne avec un coefficient de transmission pour 10m de $\tau = 0.925$ aboutit à un écart de 5.6 K.

1.4.6 Récapitulatif des erreurs possibles de mesure de la température par thermographie

Ces trois sources d'erreurs ne sont généralement pas découplées, et l'on se rend bien compte de la difficulté de mesurer une température de surface absolue à partir de la luminance obtenue grâce à une caméra thermique. Pour éviter ces écueils, les constructeurs de caméras thermiques proposent des logiciels de traitement capables d'intégrer ces paramètres environnementaux, ainsi que les propriétés de la surface mesurée. Ce sont aussi ces difficultés qui poussent les utilisateurs de caméras thermographiques à limiter leurs études à des mesures qualitatives et de suivi de défaut en s'affranchissant de la mesure de la température absolue de la surface. Le but de notre étude est donc de permettre un diagnostic quantitatif en prenant en compte notamment la valeur mesurée de l'émissivité. On peut finalement constater que les erreurs de mesures sont diverses. Pour avoir une idée de leur importance respective, nous avons récapitulé ces erreurs dans le tableau 1.1.

Chapitre 2

Les méthodes de mesure de l'émissivité

Dans ce chapitre, nous abordons les méthodes de mesure de l'émissivité. Elle ont été classées suivant le principe physique de la mesure. Nous avons séparé les méthodes dites directes des méthodes dites indirectes. Les méthodes directes sont celles où l'on mesure directement la puissance rayonnée par la surface : ce sont les méthodes calorimétriques et radiométriques. Les méthodes indirectes sont celles où les propriétés des surfaces dans le domaine spectral de l'infrarouge sont déduites des propriétés optiques par réflectométrie : c'est le cas de toutes les autres méthodes. Tous les appareils commerciaux utilisent ces méthodes indirectes d'une manière ou d'une autre. Nous aborderons les erreurs commises par les méthodes indirectes. En effet les méthodes directes ne sont limitées que par le dispositif expérimental utilisé alors que les méthodes indirectes souffrent de biais intrinsèques à la méthode de mesure elle-même. En dernier lieu nous présenterons l'état actuel des mesures d'émissivité dans les textes normatifs.

2.1 Pourquoi mesurer l'émissivité ?

Les domaines scientifique et technique nécessitant la connaissance de l'émissivité des surfaces sont nombreux. La bibliographie nous éclaire sur les domaines les plus demandeurs de ces mesures. Le premier domaine est celui des hautes températures (au-delà de 800 K). En effet les échanges radiatifs dans ce domaine de température prennent une importance

beaucoup plus grande qu'à température ambiante, la connaissance de l'émissivité (variable en fonction de la température) est indispensable. De plus, la thermographie et la pyrométrie optique sont très fréquemment utilisées à des niveaux de température pour lesquels les autres méthodes de thermométrie ne peuvent plus être utilisées. En outre ces méthodes sont sans contact et profitent d'un flux lumineux peu perturbé par l'environnement. Ce domaine est aussi celui rencontré en métallurgie. Les métaux présentent la difficulté d'être peu émissifs à température ambiante et beaucoup plus émissifs quand ils s'oxydent. Beaucoup d'études traitent de ce problème et de la mesure de l'émissivité spectrale avant et après chauffage de ces métaux [41, 42, 38, 31]. Dans ce domaine de mesure, nous pouvons inclure la métallurgie du silicium de l'industrie des semi-conducteurs [45, 46, 47]. Dans le domaine des hautes températures, l'étude des céramiques réfractaires a une place importante, elles sont très utilisées notamment dans l'aéronautique [40, 39, 44].

Le second domaine où les mesures d'émissivité sont très utilisées est le domaine des mesures de température par satellite. Les images infrarouges ne peuvent être interprêtées que si l'on a la connaissance de l'émissivité des sols. Une cartographie de l'émissivité des sols a été effectuée, notamment par la NASA [51]. Certaines méthodes d'imagerie multi-spectrale permettent d'obtenir la température et l'émissivité avec la même mesure [49, 50]. D'autres études cherchent à connaître l'émissivité en fonction de la nature de la surface pour pouvoir en déduire les échanges thermiques par rayonnement et effectuer des mesures satellitaires [48, 52]. L'importance de l'émissivité pour les climatologues a nécessité aussi de nombreuses études.

Le domaine qui nous intéresse spécifiquement dans notre étude est celui du diagnostic des structures à température ambiante. Cela fixe la bande spectrale de 1 μm à 50 μm. L'utilisation de caméras thermiques réduit la bande spectrale de l'étude au domaine de sensibilité de la caméra. En outre, dans le domaine de la thermographie, la diminution du prix des caméras et leurs applications nombreuses ont nécessité une meilleure connaissance de l'émissivité des matériaux. L'apparition des vitrages à faible émissivité [28, 29] constitue un domaine

d'investigation similaire à notre étude pour les mesures d'émissivité.

Plusieurs documents généraux peuvent compléter cette étude sur les mesures d'émissivité. On peut citer notamment :

- "Measurement of Thermal Radiation Properties of Solids", [13]. Ce document est l'ensemble des interventions d'un congrès de 1962 sur les propriétés radiatives des matériaux. Malgré l'ancienneté de cette publication, elle recense de manière très complète un grand nombre de dispositifs de mesure de l'émissivité.

- "Measurement Techniques for Thermal Radiation Properties", [12]. De la même manière, ce document fait l'état des lieux de la technique en 1990. De nouveaux dispositifs sont décrits.

- "Spacecraft Thermal Control Coatings References", [11]. Ce document de référence de la NASA qui est un des plus récents décrit dans un premier temps les grandeurs mesurées. Ensuite, un calcul théorique liant les indices complexes des matériaux et les propriétés radiatives est exposé. Les diverses méthodes de mesure sont ensuite décrites. En fin de document, des mesures sur des matériaux fréquemment utilisés dans le domaine de l'aérospatiale sont présentées. Ce document, comme le premier cité plus haut, décrit aussi les propriétés optiques dans le visible ; celles-ci sont également importantes à connaître pour déduire l'équilibre thermique d'un satellite soumis au rayonnement solaire.

2.2 Méthode calorimétrique

2.2.1 Principe de la méthode

La méthode calorimétrique permet d'évaluer les transferts radiatifs sans négliger aucune incidence ni aucune longueur d'onde. Elle consiste à effectuer un bilan énergétique des pertes radiatives de l'échantillon étudié quand celles-ci sont les seules en jeu. C'est une méthode directe et absolue, c'est-à-dire qu'elle ne nécessite pas de référence d'émissivité étalon pour obtenir l'émissivité de l'échantillon. Cette méthode reste lourde. En effet, pour éliminer les

transferts par conduction et convection, on doit placer l'échantillon sous atmosphère réduite (typiquement 10^{-5} mbar). On chauffe l'échantillon et on le maintient à la température à laquelle on souhaite connaître l'émissivité. Pour maintenir sa température, on doit lui fournir une puissance :

$$P = \sigma.(\varepsilon.T^4 - \varepsilon_e.T_e^4).S \tag{2.1}$$

où P est la puissance dissipée par l'échantillon, ε son émissivité, σ la constante de Stefan-Boltzmann, T la température de l'échantillon, ε_e l'émissivité de l'enceinte, T_e la température de l'enceinte et S la surface émissive de l'échantillon. La puissance nécessaire pour maintenir l'échantillon à la température à laquelle on souhaite connaitre l'émissivité est fournie de manière électrique sous forme d'effet Joule.

La figure 2.1 représente schématiquement un dispositif de mesure de l'émissivité par la méthode calorimétrique. L'enceinte F est maintenue sous vide à l'aide d'un dispositif de pompage relié à l'enceinte par la tuyauterie A. Les fils électriques d'alimentation et de mesure (B) sont reliés à l'échantillon par un bornier C. Celui-ci sert de garde pour éviter les pertes par conduction. La température de ce bornier est maintenue et régulée à la même température que l'échantillon. De cette manière, la puissance dissipée par conduction par les fils électriques d'alimentation et de mesure entre le bornier et l'échantillon est nulle pour cause d'absence de gradient de température. Le disque-échantillon de surface rayonnante connue est suspendu dans l'enceinte. L'enceinte E est un cryostat calorifugé généralement rempli d'azote liquide. L'hélium est utilisé quand on souhaite mesurer des émissivités à des températures basses (inférieures à 250 K) pour l'industrie spatiale. Un tel dispositif est décrit dans [15]. L'enceinte F est recouverte à l'intérieur d'un revêtement d'émissivité élevée et d'émissivité spectrale variant peu avec la longueur d'onde. Le choix de la température du cryostat est guidé par la nécessité d'avoir $\varepsilon.T^4 \gg \varepsilon_e.T_e^4$. La température idéale doit permettre d'obtenir un biais bien inférieur à l'incertitude de mesure du dispositif. A partir de la relation 2.1, on peut en déduire l'émissivité (2.2) :

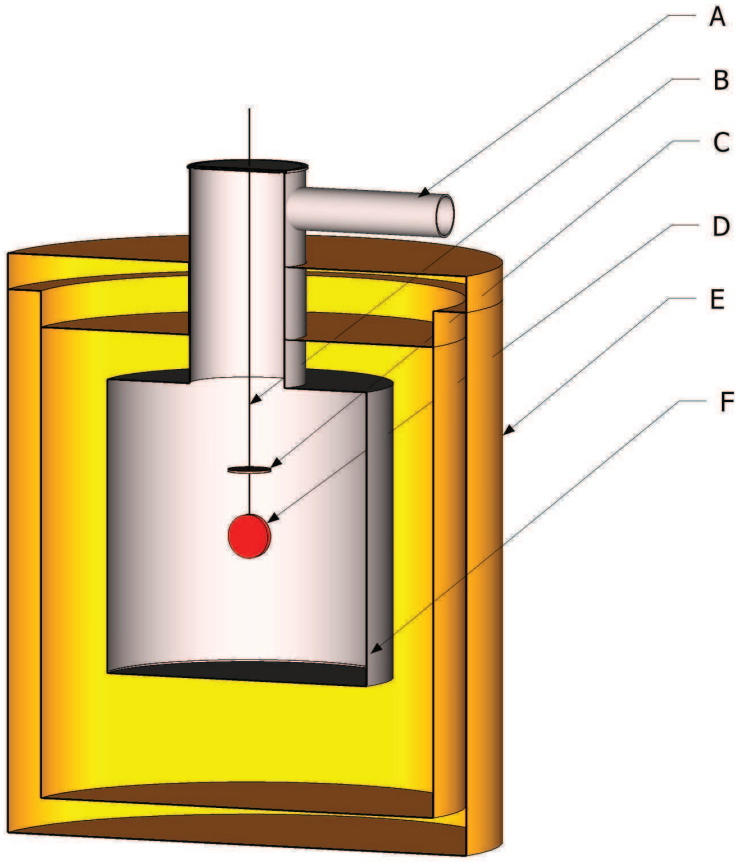


FIGURE 2.1 – Schéma d'un dispositif de mesure de l'émissivité par la méthode calorimétrique : (A) raccord vers la pompe à vide ; (B) fils électriques d'alimentation et de mesure ; (C) bornier thermostaté ; (D) échantillon ; (E) cryostat ; (F) enceinte de mesure refroidie sous vide

$$\varepsilon = \frac{P}{\sigma.T^4.S} \tag{2.2}$$

Une relation plus complète prenant en compte l'émissivité de l'enceinte, ainsi que le flux et l'émissivité de l'anneau de garde s'il y en a un, se trouve dans la référence [14].

2.2.2 Avantages et limites de la méthode

La méthode calorimétrique est la seule à permettre une détermination directe de l'émissivité totale hémisphérique. L'intégralité du rayonnement est pris en compte. Le fait qu'elle ne nécessite pas de référence ou d'étalon d'émissivité permet d'en faire une méthode de référence. Cette méthode reste cependant lourde et longue à mettre en oeuvre. Il serait difficile

de constituer une base de données d'émissivité avec cette seule méthode. La source d'incertitude principale est la mesure de température de surface. Celle-ci peut être extrapolée en mesurant le gradient de température à l'intérieur de l'échantillon à l'aide de différents capteurs [14]. Par ailleurs, il est nécessaire d'avoir des échantillons calibrés en taille pour s'insérer dans le dispositif de mesure. D'autres dispositifs plus simples sont décrits dans[16].

2.3 Méthode radiométrique

2.3.1 Méthode par mesure directe du flux émis par la surface

Cette méthode consiste à comparer la luminance d'un échantillon à celle d'un corps noir porté à la même température. Le dispositif est décrit fig 2.2. Sur cette figure, l'échantillon A est porté à la température à laquelle on souhaite mesurer l'émissivité. Celui-ci est placé dans une enceinte refroidie B avec les mêmes conditions de température que pour la méthode calorimétrique ($\varepsilon.T^4 \gg \varepsilon_e.T_e^4$). Un corps noir E porté à la même température que l'échantillon est la référence de luminance. On mesure successivement la luminance du corps noir et celle de l'échantillon grâce au miroir basculant C . Le rapport entre ces deux luminances donne l'émissivité. Le corps noir est placé dans une enceinte calorifugée sans condition de température. On mesure les deux luminances grâce au détecteur D. Celui-ci peut être un détecteur infrarouge large bande (comme une thermopile) pour mesurer l'émissivité totale. Ce détecteur peut être muni d'une roue porte-filtre pour mesurer l'émissivité spectrale pour différentes longueurs d'onde [18]. L'ensemble des dispositifs de mesure d'émissivité par comparaison à un corps noir du NIST (National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, Etat-Unis) est présenté dans [23]. Ce dispositif fait référence dans le domaine pour les mesures d'émissivité pour des températures allant de 600 K à 1400 K . L'émissomètre décrit par [19] utilise un spectromètre infrarouge à transformée de Fourier. La luminance est donc mesurée dans une seule direction, on mesure ainsi une émissivité directionnelle. Pour mesurer différentes incidences et remonter à l'émissivité hémisphérique, certains dispositifs permettent de faire tourner l'échantillon : c'est le cas du dispositif décrit dans [19]. Le spec-

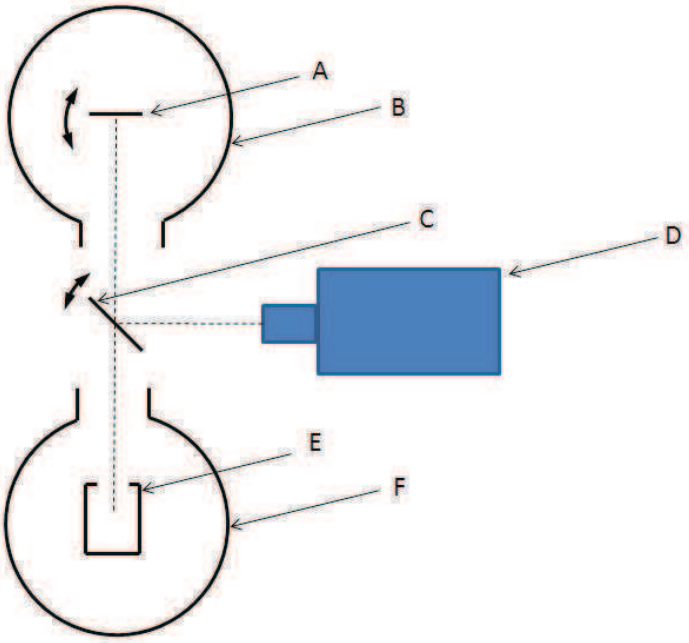


FIGURE 2.2 – Schéma d'un dispositif de mesure de l'émissivité par la méthode radiométrique : (A) échantillon ; (B,F) enceinte refroidie ; (C) miroir basculant permettant de viser alternativement l'échantillon ou le corps noir ; (D) système de détection du flux infrarouge ; (E) corps noir

tromètre peut aussi être remplacé par un monochromateur comme le dispositif décrit dans [17].

La mesure radiométrique à température ambiante nécessite de placer l'échantillon dans un cryostat à très basse température et sous vide pour éviter la condensation. Un dispositif original évitant ce problème est décrit dans [21]. Le principe reste le même, cependant les mesures sont effectuées à température ambiante, le flux mesuré est ensuite corrigé à partir des mesures de température de l'enceinte et du chopper. Cela simplifie grandement le dispositif, mais introduit des sources d'incertitude supplémentaires.

2.3.2 Méthode radiométrique périodique

La méthode radiométrique périodique consiste à moduler faiblement la température de l'échantillon autour de la température où l'on désire connaître l'émissivité. Ainsi, on peut séparer le flux réfléchi du flux propre de l'échantillon. C'est le principe de la méthode ra-

diométrique modulée. Pour obtenir l'émissivité, on doit comparer le flux mesuré à celui d'une surface d'émissivité connue. Une autre méthode consiste à moduler aussi une source hémisphérique à une fréquence différente de la fréquence modulation de l'échantillon. En effectuant la mesure sur deux échantillons inconnus, on peut obtenir la valeur de l'émissivité et de la réflectivité. Cette méthode ne nécessite pas de référence d'émissivité pour effectuer la mesure. La méthode radiométrique périodique est détaillé dans [20].

2.4 Méthode réflectométrique, méthodes indirectes

2.4.1 Principe

La méthode réflectométrique consiste à mesurer le coefficient de réflexion hémisphérique directionnel $\rho^{\bigcap|}$ ou le coefficient de réflexion directionnel hémisphérique $\rho^{|\bigcap}$ afin de calculer l'émissivité directionnelle pour une direction équivalente à celle utilisée pour mesurer le coefficient de réflexion. Ce calcul se base sur la loi de Kirchhoff (voir § 1.2.4). On peut énoncer cette loi ainsi : pour une surface opaque en équilibre thermique avec son environnement, on peut écrire pour une longueur d'onde λ : $\rho_{\lambda}^{\bigcap|} + \varepsilon_{\lambda}^{|} = 1$. L'équilibre thermique impose une température identique pour l'environnement et pour la surface en question. On peut élargir cette relation à une plage de longueur d'onde : $\rho_{\lambda1-\lambda2}^{\bigcap|} + \varepsilon_{\lambda1-\lambda2} = 1$ où $\rho_{\lambda1-\lambda2}^{\bigcap|}$ est le coefficient de réflexion hémisphérique directionnel calculé entre $\lambda1$ et $\lambda2$. Le calcul de $\rho_{\lambda1-\lambda2}^{\bigcap|}$ s'exprime ainsi :

$$\rho_{\lambda1-\lambda2}^{|\bigcap}(T) = \rho_{\lambda1-\lambda2}^{\bigcap|}(T) = \frac{\int_{\lambda1}^{\lambda2} \rho^{|\bigcap}(\lambda).M(\lambda,T)d\lambda}{\int_{\lambda1}^{\lambda2} M(\lambda,T)d\lambda} \tag{2.3}$$

On peut calculer ce coefficient de réflexion soit en mesurant la réflectance pour toutes les longueurs d'onde et en effectuant l'intégration pondérée par l'émittance du corps noir (équation 2.3), soit en s'assurant que l'on mesure la réflectance avec une source lumineuse ayant la même répartition spectrale énergétique que le corps noir à la température considérée. Il faut en outre s'assurer que le détecteur infrarouge utilisé possède une réponse suffisamment

constante dans le domaine spectral considéré. A condition que la réflectance spectrale ne varie pas avec la température, on peut calculer cette réflectance sans se soucier de la température de l'échantillon. Nous allons voir plusieurs méthodes de mesure d'émissivité à partir de la mesure de réflectance.

2.4.2 Méthode par sphère intégrante

La figure 2.3 montre le fonctionnement d'une sphère intégrante. Celle-ci doit être recouverte intérieurement d'un revêtement réfléchissant et diffusant. On éclaire l'échantillon grâce à une source infrarouge dans une direction donnée proche de la normale. L'angle d'incidence dans les sphères intégrantes commerciales est compris entre 8 et 12 degrés. Une fois que la lumière a atteint l'échantillon, celle-ci est diffusée dans toutes les directions selon l'indicatrice de réflectance du matériau. Après de multiples réflexions, la lumière atteint le détecteur placé sur le côté. Ainsi le détecteur mesure une fraction de l'ensemble de la lumière réfléchie. Un système de bafflage évite que le détecteur ne voie directement l'échantillon pour ne pas perturber la mesure. Un détecteur est placé symétriquement à la source pour mesurer la réflexion spéculaire. Celui-ci est optionnel, et sur certaines sphères on peut mettre à l'emplacement de la réflexion spéculaire soit une portion de surface diffusante de même nature que la sphère, soit laisser ouvert celui-ci. Dans le premier cas, on mesure l'ensemble du flux réfléchi (diffus et spéculaire) et dans l'autre cas seulement le flux diffus. Par soustraction, on peut obtenir le coefficient de réflexion spéculaire. Pour effectuer une mesure de coefficient de réflexion, il est nécessaire d'étalonner le dispositif avec une référence de réflectance. On utilise le même type de revêtement que celui utilisé pour la sphère. C'est généralement une surface métallique sablée ou microbillée recouverte d'une couche d'or. Un dispositif de ce type est utilisé au NIST. Il est décrit dans [27].

2.4.3 Méthode utilisant une source modulée

Pour séparer le flux propre de l'échantillon du flux réfléchi, on envoie sur celui-ci un flux hémisphérique modulé en fréquence. Deux exemples de réalisation montrent comment

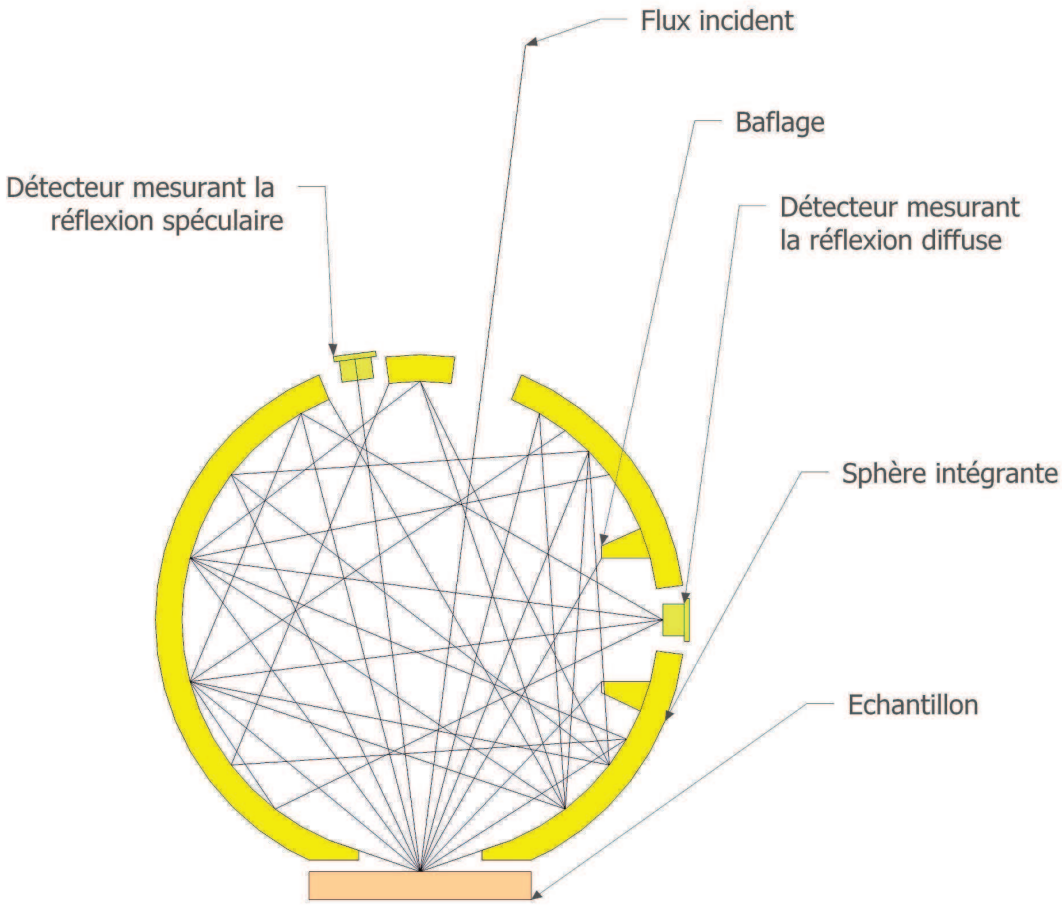


FIGURE 2.3 – Schéma d'un dispositif de mesure de la réflexion directionnelle hémisphérique par la méthode de la sphère intégrante

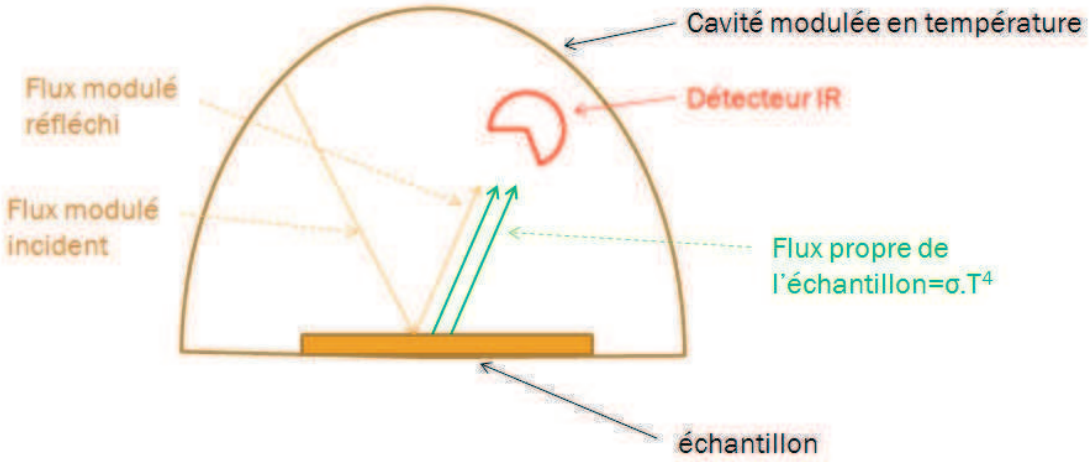


FIGURE 2.4 – Schéma d'un dispositif de mesure de la réflexion hémisphérique directionnelle en utilisant une cavité modulée en température

l'on peut moduler ce flux. La modulation peut être utilisée aussi bien avec une approche calorimétrique que radiométrique comme cela est démontré et décrit dans [55].

a. Exemple de l'émissomètre EM1

Le principe consiste à produire un flux infrarouge hémisphérique modulé autour de l'échantillon étudié et de mesurer, dans une direction, le flux réfléchi par la surface du matériau à l'aide d'une thermopile. Le schéma de la figure 2.4 montre le principe du dispositif. On étalonne auparavant le dispositif grâce à un matériau de référence connu. Dans notre cas, il s'agit d'une plaque d'aluminium rugueux d'émissivité $\varepsilon_{ref} = 0.063$. La figure 2.5 montre le schéma de l'appareil développé au CERTES ainsi qu'une photo de l'instrument.

La cavité est constituée d'un cube creux en aluminium ouvert par le bas. La température des parois est modulée grâce à des éléments à effet Peltier. Le programme de contrôle réalisé sous Labview© permet de contrôler la fréquence et l'amplitude de modulation. Le programme permet en outre de superposer plusieurs sinusoïdes à des fréquences différentes. Une modulation de l'ordre de 2 K s'effectue autour de la température ambiante, c'est-à-dire 300 K. Un orifice pratiqué sur le dessus de la cavité permet de mesurer la luminance de l'échantillon en focalisant le flux modulé réfléchi par l'échantillon sur la thermopile. On mesure une tension modulée $\widetilde{U}$. En effectuant la mesure sur une surface de référence, on peut

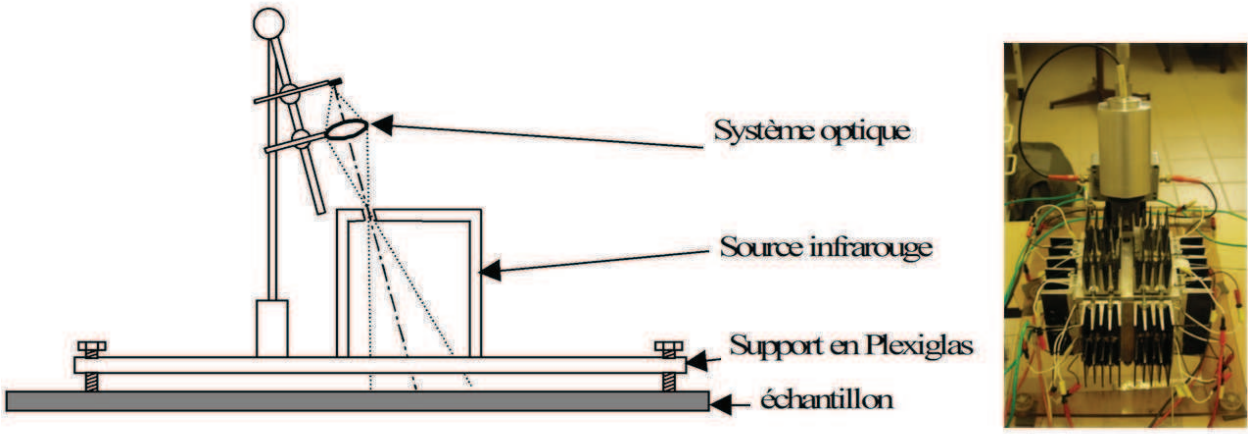


FIGURE 2.5 – Schéma et photo de l'émissomètre EM1 à cavité modulée en température

déterminer la constante d'étalonnage K :

$$K = (1 - \varepsilon_{ref}) \cdot \frac{|T^4_{source}|}{|U_{ref}|} \tag{2.4}$$

A partir de cet étalonnage on peut mesurer l'émissivité d'un échantillon en remplaçant l'échantillon de référence par celui-ci (équation 2.5) :

$$\varepsilon = 1 - K \cdot \frac{|\widetilde{U}|}{|T^4_{source}|} \tag{2.5}$$

La figure 2.6 présente des signaux obtenus lors d'une mesure effectuée sur un échantillon de glissière de sécurité en acier galvanisé.

Comme on peut le constater sur les exemples de signaux, l'appareil présente un bruit faible. Le problème principal rencontré en utilisant l'émissomètre EM1 est la durée de mesure relativement longue (16 mn). En effet, l'objectif à atteindre est d'être capable de réaliser une base de données sur les mesures d'émissivité. En outre, l'appareil n'est pas configuré pour mesurer des émissivités sur des échantillons très spéculaires comme les métaux polis. Un autre problème rencontré avec des fréquences de modulation trop lentes est que l'échantillon peut chauffer à cette même fréquence de modulation si son effusivité est trop faible. Cet inconvénient peut être contourné en mesurant la phase du signal de la thermopile. En effet, le flux réfléchi est forcément en phase avec les variations de la température de la cavité et le

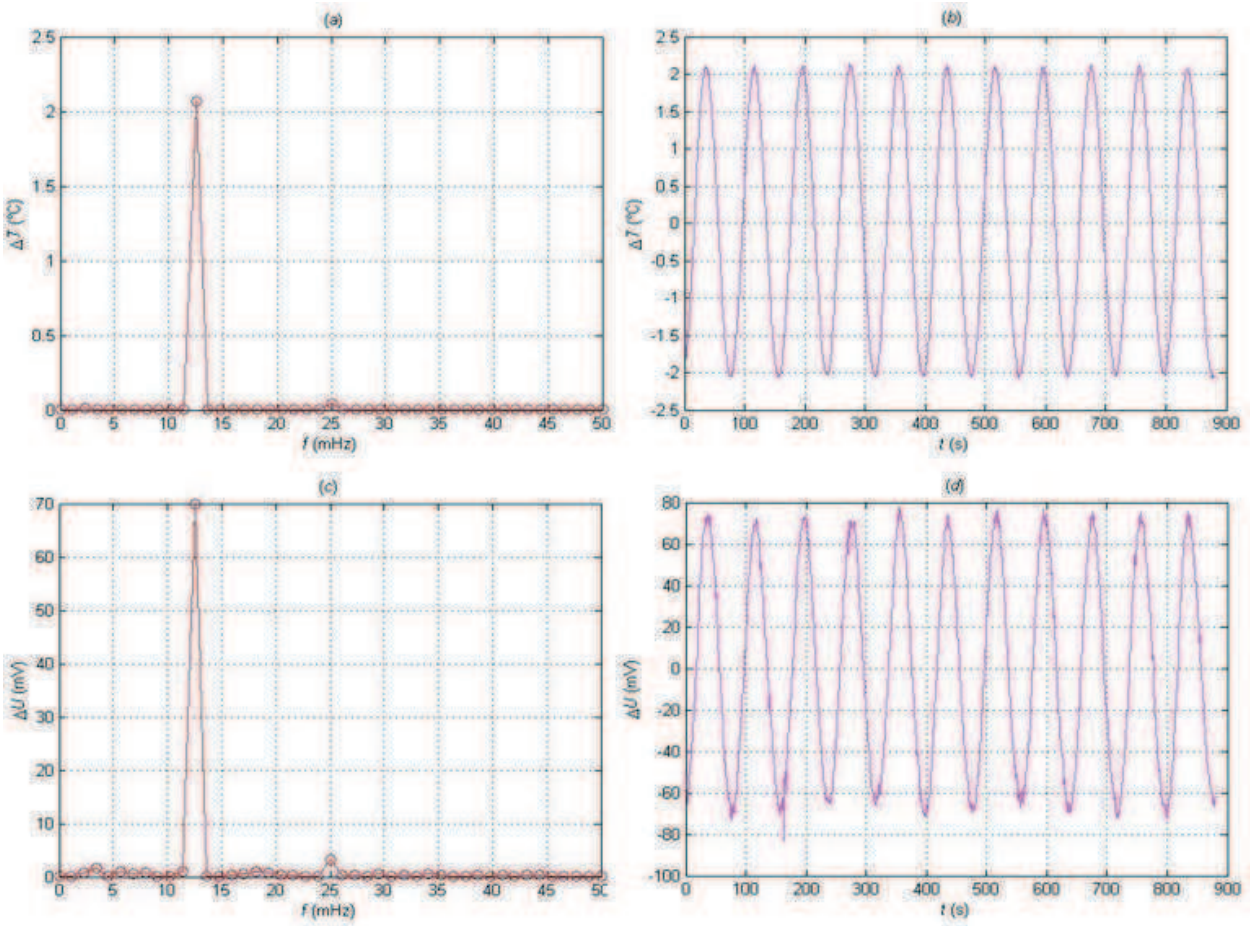


FIGURE 2.6 – Exemple de signaux mesurés avec l'émissomètre EM1 : température source (b), tension thermopile (d) ; FFT correspondantes (a) et (c) respectivement ; données obtenues lors de la caractérisation d'un échantillon de glissière de sécurité en acier galvanisé

flux propre de l'échantillon (considéré comme un solide semi-infini) déphasé de $\frac{\pi}{4}$ (on obtient ce résultat par la résolution de l'équation de Fourier en régime harmonique). On peut se référer à [25] pour plus de détails sur les mesures effectuées avec cet appareil.

2.5 Exemple d'appareils commerciaux de mesure de l'émissivité

Dans cette partie, nous ne détaillerons pas les accessoires permettant de mesurer l'émissivité spectrale grâce à un spectromètre à transformée de Fourier. Il existe plusieurs dispositifs utilisant des sphères intégrantes ainsi qu'un dispositif spécifique permettant de mesurer la réflectance sur du verre plat selon la norme NF-EN-12898.

2.5.1 Appareil utilisant une source modulée : Temp 2000A de AZ-Technology

Cet appareil (figure 2.8) remplace un ancien appareil fabriqué par Gier et Dunkle [11]. La figure 2.7 montre un extrait du brevet (patent number US-5659397). La description qui suit reprend les numéros de la légende du schéma. La source (56) est hachée par un écran mobile (122) (fréquemment dénommé chopper). L'écran mobile est ajouré au niveau de (124). Un miroir (60) focalise la lumière issue de la source vers l'échantillon. L'échantillon est placé au foyer d'un ellipsoïde (20). Le deuxième foyer est occupé par le détecteur (70). Ainsi, tous les rayons réfléchis issus de l'échantillon convergent vers le détecteur. Comme dans la sphère intégrante, des orifices peuvent être pratiqués pour éliminer la réflexion spéculaire. Pour effectuer l'étalonnage, un dispositif astucieux permet d'envoyer la totalité du faisceau issu de la source vers le détecteur : un miroir (80) monté sur un tiroir (86) peut s'interposer dans le trajet du faisceau pour envoyer la totalité du flux vers le détecteur. Si l'on connaît le coefficient de réflexion du miroir, on peut en déduire le coefficient de réflexion de l'échantillon.

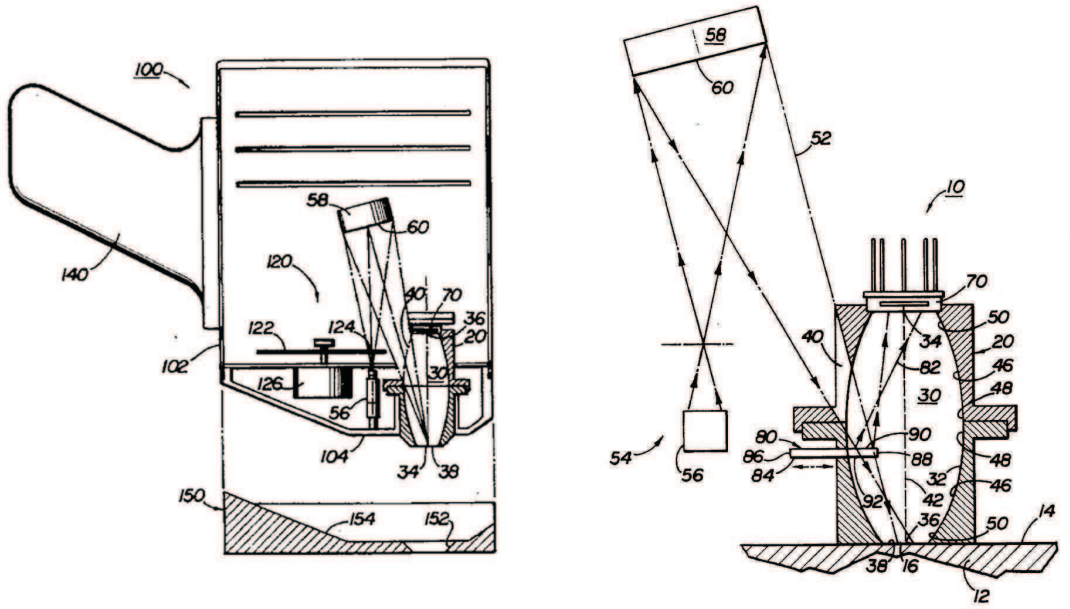


FIGURE 2.7 – Schéma de l'émissomètre Temp-2000 de AZ-Technology issus du brevet déposé par AZ-Technology (patent number 5659397)

FIGURE 2.8 – Photos de l'émissomètre Temp-2000 de AZ-Technology

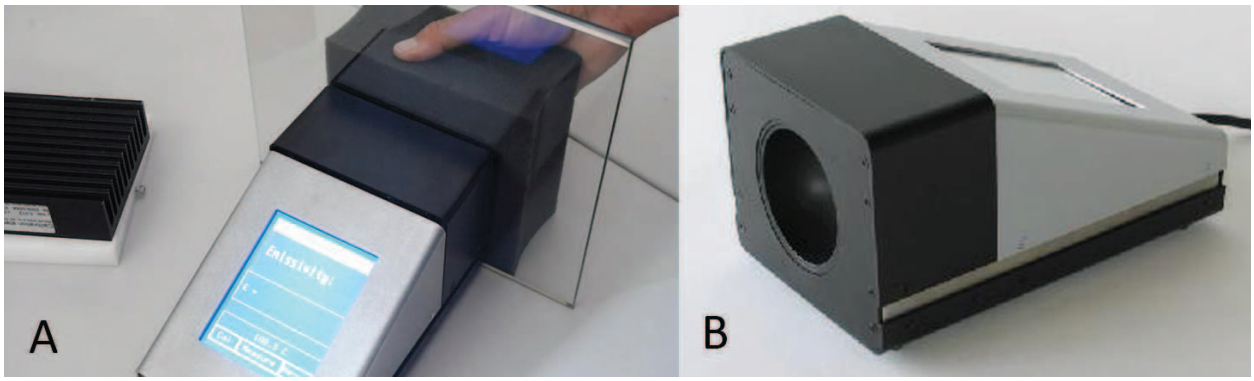


FIGURE 2.9 – Emissomètre TIR100-2, A : en cours de mesure, B : vue de la cavité émissive (documentation INGLAS®)

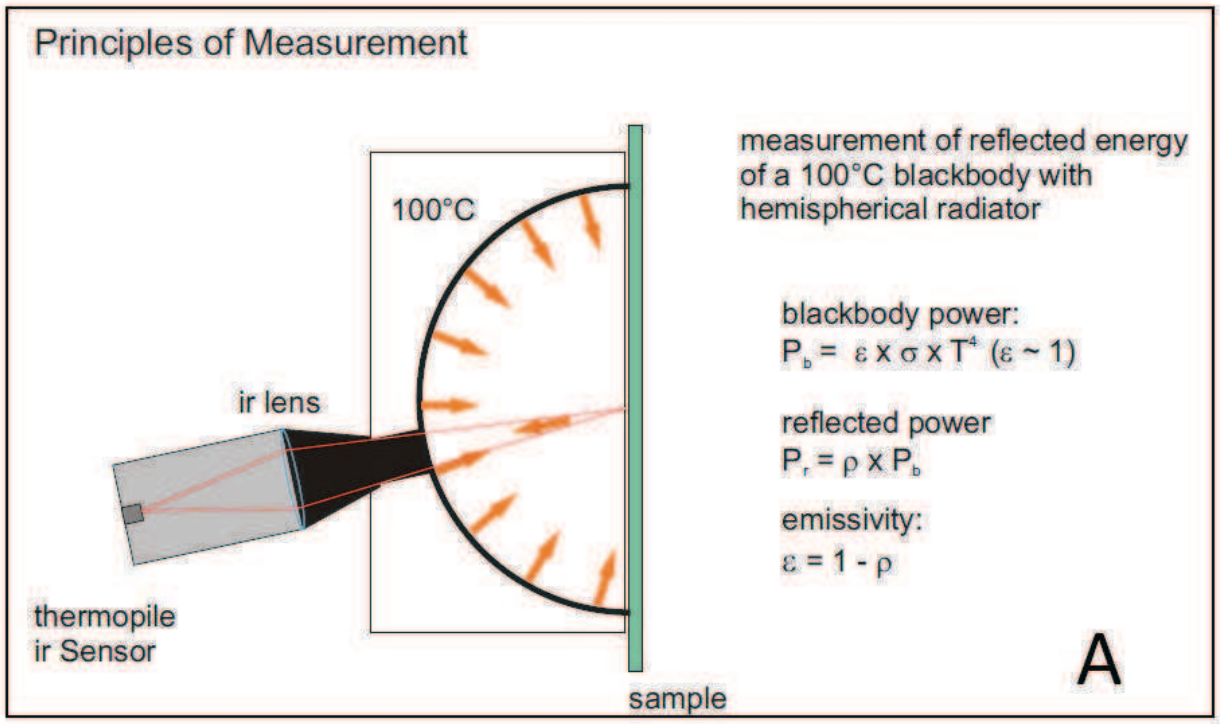
2.5.2 Appareil utilisant une méthode réflectométrique non modulée : TIR100-2 de INGLAS

Cet appareil présenté figure 2.9 fonctionne sur le principe décrit par le schéma A de la figure 2.10. Il permet de mesurer l'émissivité totale directionnelle. La surface à mesurer est éclairée par une source infrarouge hémisphérique recouverte d'un revêtement émissif portée à 100 °C. On mesure la réflexion grâce à une lentille de Fresnel focalisant sur une thermopile le flux quasi-normal provenant de la réflexion sur la surface à mesurer. Après un étalonnage (figure 2.10-B) effectué avec deux émissivités connues ($\varepsilon_H = 0.955$ et $\varepsilon_L = 0.012$) on peut déterminer l'émissivité d'une surface inconnue grâce à la relation suivante :

$$\varepsilon = \varepsilon_H + (\varepsilon_H - \varepsilon_L) \cdot \frac{U_H - U}{U_L - U_H} \tag{2.6}$$

où U_H, U_L et U sont les tensions mesurées par la thermopile quand on présente successivement les surfaces d'émissivité ε_H, ε_L et l'émissivité inconnue.

L'appareil est fourni avec les deux calibres d'émissivité et un abaque permettant d'obtenir l'émissivité totale hémisphérique. La procédure d'étalonnage est automatique. Le TIR200-1 présente l'inconvénient majeur de ne pouvoir effectuer une mesure d'émissivité correcte que si les deux calibres et de la surface à mesurer sont à la même température. En outre un biais systématique n'est pas corrigé, il faudra se reporter au §2.6.5 pour obtenir une mesure correcte.



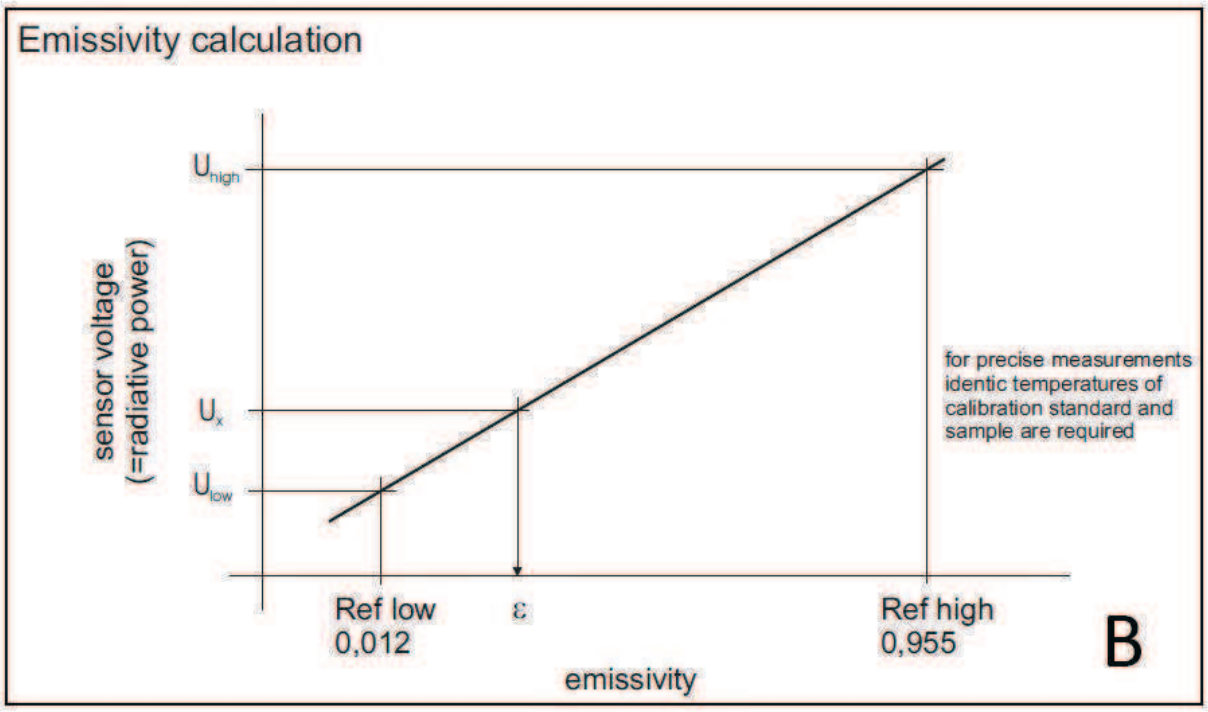


FIGURE 2.10 – Emissomètre TIR100-2, A : principe de fonctionnement, B : méthode d'étalonnage (documentation INGLAS®)

2.5.3 Appareil utilisant une méthode réflectométrique non modulée : AE de D&S

Cet appareil permet d'effectuer des mesures d'émissivité hémisphérique totale. Le principe consiste à mettre en regard de la surface à étudier une thermopile chauffée et recouverte d'une surface d'émissivité élevée (figure 2.11). Cet appareil suppose que la surface émissive de la thermopile est grise (peinture Nextel© de 3M©). La tension fournie par la thermopile peut se calculer ainsi :

$$U = k \cdot \sigma \frac{T_e^4 - T_d^4}{\frac{1}{\varepsilon_e} + \frac{1}{\varepsilon_d} - 1} \tag{2.7}$$

où l'indice e correspond à l'échantillon, et l'indice d correspond au détecteur. T, ε, σ et k sont respectivement la température, l'émissivité, la constante de Stefan-Boltzmann et une constante d'étalonnage. Le dispositif est décrit succintement dans la documentation du constructeur. En réalité, il y a deux thermopiles, l'une recouverte d'un revêtement de forte émissivité et l'autre recouverte d'un revêtement de faible émissivité. On mesure la différence de tension entre ces deux thermopiles. C'est cet ensemble qui est appelé thermopile dans la documentation du constructeur. Pour plus d'information, il faut se reporter au document ASTM C1371 (voir §2.7.3) dans lequel on fait référence à cet appareil et où la description est plus précise. Une étude comparative de mesures d'émissivité faites avec cet appareil se trouve dans [34] ; après un étalonnage, on peut mesurer l'émissivité d'un échantillon.

2.6 Erreurs de mesures de l'émissivité dues à la méthode de mesure utilisée

2.6.1 Erreurs dues à la limitation de la bande spectrale

Certains dispositifs sont limités en bande spectrale pour les mesures radiométriques ou réflectométriques. Il est utile de connaître l'erreur commise si l'on néglige une partie du

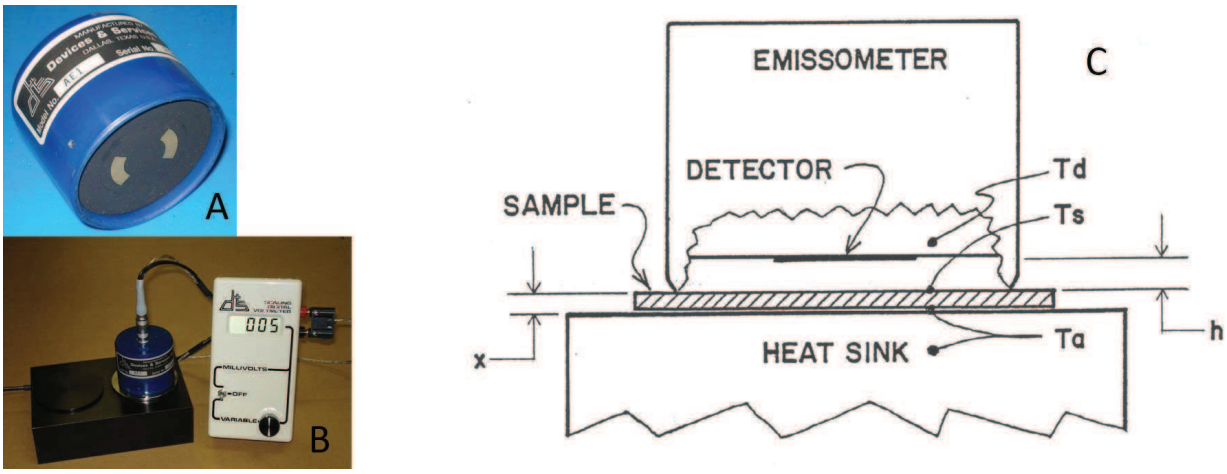


FIGURE 2.11 – Emissomètre AE de Devices and Services®, A : Vue de la thermopile, B : Photo de l'appareil, C : schéma en coupe de l'émissomètre (documentation D&S®)

spectre. Généralement, la limitation pour des mesures d'émissivité à température ambiante ne provient pas des courtes longueurs d'ondes. Pour les ondes longues, une limitation de la bande spectrale à 20 μm néglige 26% du flux. Il faut connaître le biais commis dans ce cas. On traitera les conducteurs et les diélectriques séparément. La théorie de la dispersion énoncée par Drude de l'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde [9] nous permet d'avoir une idée des variations de l'indice complexe.

Cette théorie impose aux conducteurs d'avoir une émissivité décroissante en fonction de la longueur d'onde. Les métaux ayant une émissivité déjà faible autour de 10 μm, celle-ci ne peut donc varier que de quelques fractions de pourcent sur une plage de longueur d'onde contenant peu de puissance rayonnée.

Pour les diélectriques, dans la bande spectrale ne possédant pas de bandes d'absorption dues à des pulsations propres d'oscillateur (vibration, rotation, torsion...), l'indice de réfraction décroît avec la longueur d'onde pour des raisons de causalité dites de Kramers-Kronig. Si l'on reprend l'expression de l'émissivité directionnelle normale en fonction de l'indice de réfraction complexe (1.18) et que l'on dérive cette expression en fonction de l'indice, on constate que l'émissivité est une fonction décroissante de l'indice, et donc une fonction croissante de la longueur d'onde. Pour un diélectrique d'indice de réfraction de 1.5, on peut calculer son émissivité comme étant égale à 0.96. Dans le cas extrême où l'émissivité varie

brutalement de 0.96 à 1 à partir de 20 μm, cela ne pourra entraîner qu'une erreur de 1%. Si l'on souhaite minimiser cette erreur, on se reportera à [28] où il est étudié une extrapolation de l'émissivité après 20 μm soit par une valeur constante de l'émissivité à partir de 20 μm, soit par une extrapolation polynomiale. Dans ces deux cas, le biais sur l'émissivité est réduit à quelques millièmes d'unité. Cette méthode est utilisable aussi pour les conducteurs.

2.6.2 Erreurs dues au caractère non gris du matériau à mesurer

Pour utiliser une méthode de mesure de l'émissivité utilisant la réflexion, il est nécessaire de revenir à des considérations théoriques. Dans cette approche, on cherche à obtenir l'émissivité totale directionnelle définie par l'équation 1.14. Pour cela, on utilise la loi de Kirchhoff pour remplacer l'émissivité spectrale directionnelle par une expression faisant apparaître la réflectance spectrale hémisphérique directionnelle :

$$\varepsilon^{|} = \varepsilon(T, \theta, \varphi) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (1 - \rho(\lambda, T, \theta, \varphi)) \cdot L_0(\lambda, T, \theta, \varphi)\, \mathrm{d}\lambda}{\int_0^{\infty} L_0(\lambda, T, \theta, \varphi)\, \mathrm{d}\lambda} \tag{2.8}$$

On modifie cette équation pour faire apparaître le coefficient de réflexion dans la bande spectrale concernée :

$$\varepsilon^{|} = \varepsilon(T, \theta, \varphi) = 1 - \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho(\lambda, T, \theta, \varphi) \cdot L_0(\lambda, T, \theta, \varphi)\, \mathrm{d}\lambda}{\int_0^{\infty} L_0(\lambda, T, \theta, \varphi)\, \mathrm{d}\lambda} \tag{2.9}$$

soit :

$$\varepsilon^{|} = \varepsilon(T, \theta, \varphi) = 1 - \rho \tag{2.10}$$

où ρ est le coefficient de réflexion directionnel hémisphérique dans la bande comprise entre λ_1 et λ_2. Pour obtenir ce coefficient, on a vu précédemment que l'on pouvait effectuer une mesure spectrale et effectuer une sommation pondérée par la luminance du corps noir (équation 1.14).

On peut aussi effectuer la mesure sur la bande spectrale entière. C'est le cas quand on utilise aucun dispositif spectral et un détecteur ayant une large bande spectrale. Il faut, pour que l'on puisse effectuer des mesures d'émissivité, que la sensibilité ne varie pas avec la

longueur d'onde. C'est le cas par exemple des thermopiles. Dans ce cas, il est nécessaire de mesurer le coefficient de réflexion en utilisant une source ayant la même répartition spectrale que le corps noir à la température dont on souhaite connaître l'émissivité. En effet, les surfaces étudiées ne sont généralement pas grises. Cette source ne peut être qu'un corps noir ou gris à cette même température. L'émissivité calculée ne sera valide que pour une plage de température limitée.

Pour étudier l'impact du caractère non gris d'une surface sur la mesure d'émissivité, on prend une surface théorique ayant une émissivité variant brutalement. En prenant le cas le plus défavorable d'un corps dichroïque, c'est-à-dire d'émissivité égale à 1 jusqu'à λ_c, longueur d'onde de coupure et d'émissivité égale à 0 pour des longueurs d'onde supérieures à λ_c, on peut évaluer l'erreur maximale que l'on peut avoir sur l'émissivité. L'étude portant sur l'émissivité à température ambiante, on choisit comme température centrale 300 K. La longueur d'onde de coupure entraînant le plus de variation de l'émissivité est celle pour laquelle le rayonnement du corps noir est maximal. Pour 300 K, cette longueur d'onde est de $\lambda_c = 10\,\mu$m. Par le calcul on trouve une émissivité de cette surface dichroïque égale à : $\varepsilon(300\,\mathrm{K}) = 0.275$. Cette valeur correspond à la fraction de l'émittance pour une longueur d'onde inférieure à λ_c que l'on peut trouver notamment dans [1]. La figure 2.12 montre la variation d'émissivité d'un tel corps en fonction de la température. Dans ce cas extrême, on peut constater que l'on a une variation de 1% de l'émissivité pour une variation de température de l'ordre de 5 K.

On constate sur la figure 2.12 que l'émissivité est quasiment une fonction linéaire de la température. Après régression linéaire on obtient :

$$\varepsilon^{|} = 2.21 \cdot 10^{-3} \cdot T - 0.388 \tag{2.11}$$

Le paramètre d'intérêt est ici la pente des variations de l'émissivité en fonction de T, qui est en outre proportionnelle au saut de réflectance spectrale à $10\,\mu$m. L'écart d'émissivité $\Delta\varepsilon$ en % en fonction de l'écart de température peut donc s'écrire :

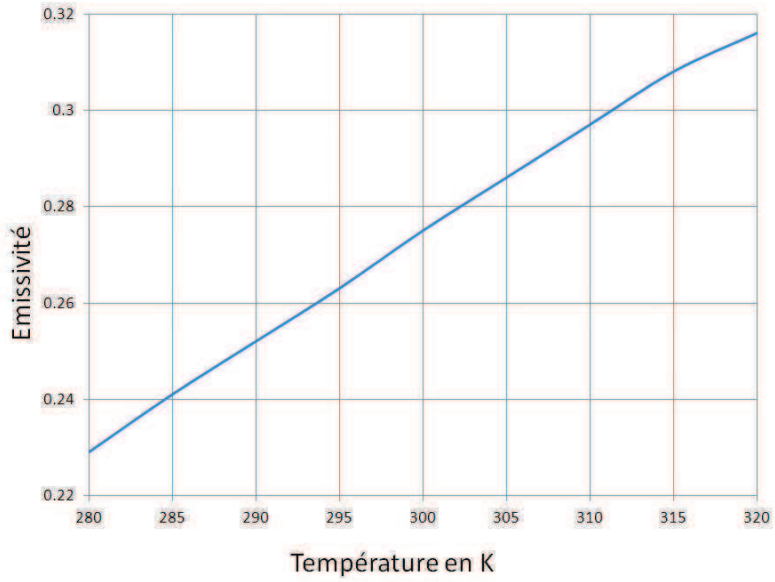


FIGURE 2.12 – Emissivité totale directionnelle d'une surface dichroïque en fonction de la température pour une longueur d'onde de coupure $\lambda_c = 10\,\mu$m

$$\Delta\varepsilon = 2.21 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta\rho \cdot \Delta T \tag{2.12}$$

où $\Delta\rho$ et $\Delta\varepsilon$ sont exprimés en %.

Exprimé autrement, si un corps est non gris, avec une variation de réflectance spectrale égale à $\Delta\rho$ (le cas le plus défavorable étant un saut de $\Delta\rho$ à $10\,\mu$m), et que l'on souhaite une erreur sur l'émissivité inférieure à $\Delta\varepsilon$ en %, il faut que la plage de température varie dans une limite de $\pm\Delta T$:

$$\Delta T < \frac{\Delta\varepsilon \cdot 453}{\Delta\rho} \tag{2.13}$$

Cela donne un lieu des points permettant une mesure acceptable sur la figure 2.13.

On peut appliquer cette étude en effectuant le calcul d'émissivité pour un matériau réel. Considérons par exemple le cas de l'alumine qui a la propriété d'avoir une réflectance spectrale très variable autour de $10\,\mu$m. Le spectre de réflexion est présenté figure 2.14. En intégrant la réflectance spectrale pondérée par la luminance spectrale du corps noir à différentes températures, on obtient les valeurs du tableau 2.1. Dans celui-ci se trouvent

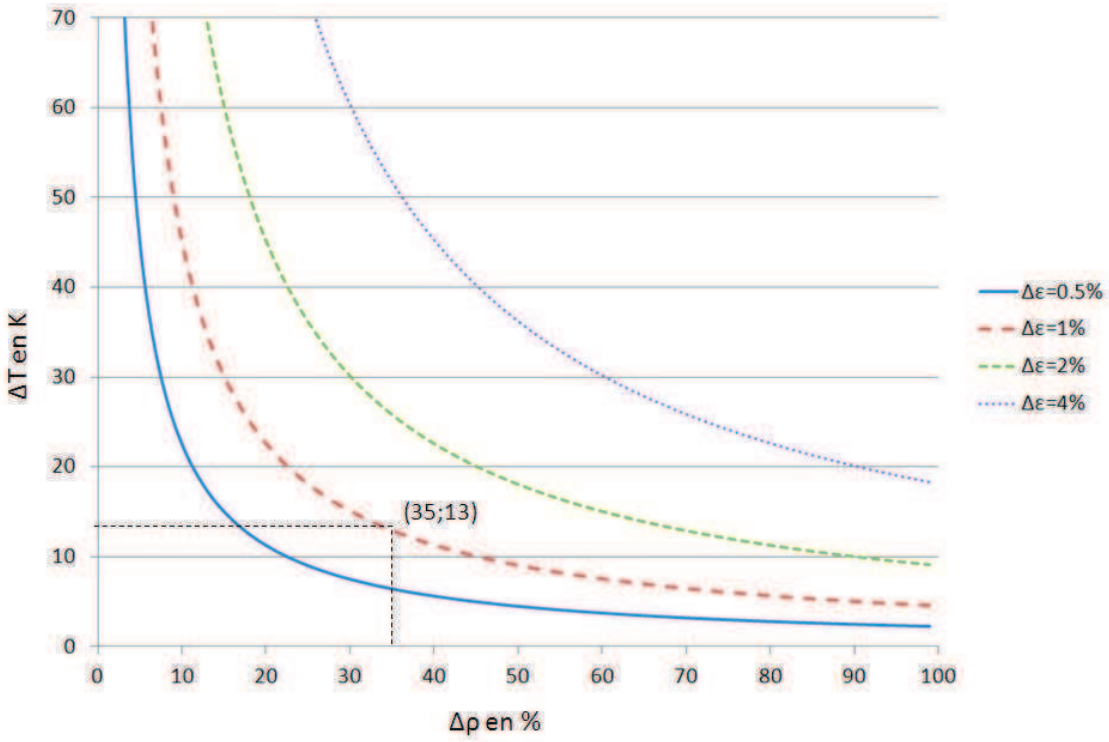


FIGURE 2.13 – Abaque des écarts d'émissivité en fonction du saut de réflectance spectrale en % et de la température en K

l'émissivité en bande large (0 à 20 μm) et dans la bande III (8 à 14 μm) en fonction de la température. La première bande dite bande large néglige dans cette étude le flux au-delà de 20 μm, ce qui représente une part de 26% (d'où l'intérêt de développer un émissomètre mesurant l'émissivité dans une bande plus étendue). Cependant, le but de ce calcul est de vérifier la plage de température de la source qui assurera la validité de nos mesures. La figure 2.15 montre les variations de l'émissivité de l'alumine en fonction de la température. Le saut de réflectance est de l'ordre de 35%. Sur l'abaque de la figure 2.13, on peut lire que pour une erreur inférieure à 1% on doit limiter la variation de température à 13 K. On constate que sur la figure 2.15 une variation de 15 K correspond sensiblement à 1% de variation de l'émissivité. En conclusion, si l'on connaît la nature du matériau, c'est-à-dire sa réponse spectrale, on peut évaluer la plage de validité d'une mesure d'émissivité.

2.6.3 Erreurs dues à la sensibilité du détecteur

Si l'on reprend la relation 2.9 en tenant compte de la sensibilité du détecteur, on obtient :

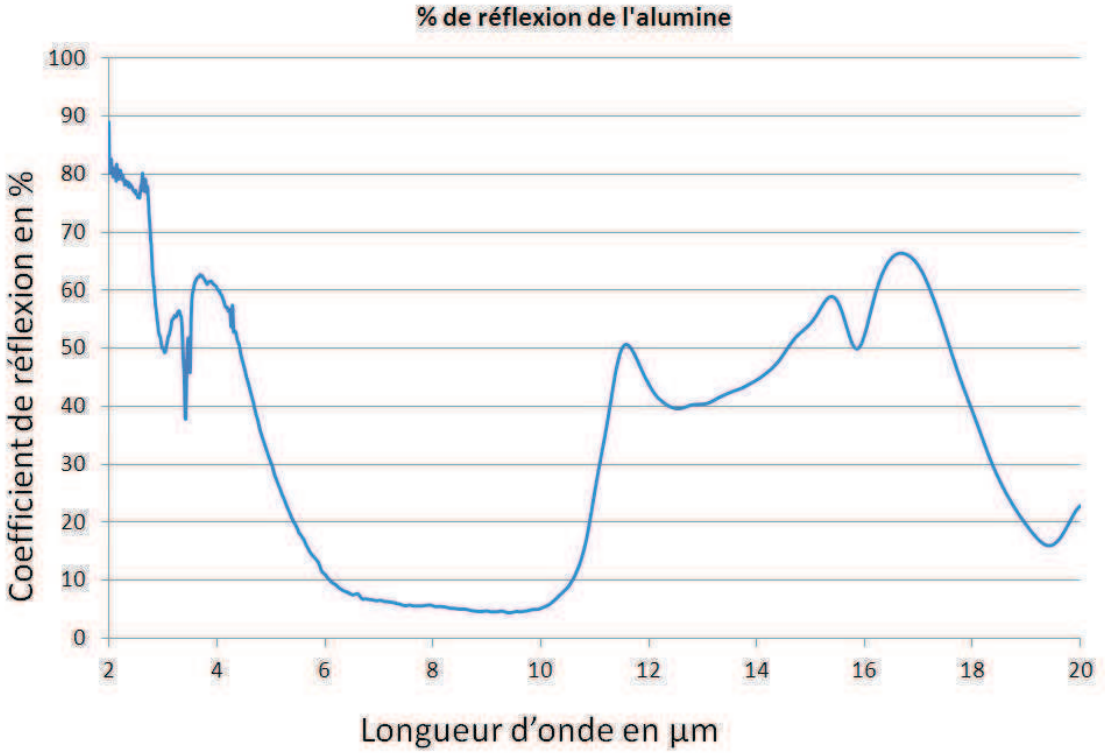


FIGURE 2.14 – Réflectance spectrale de l'alumine entre 2 et 20 μm mesurée grâce à une sphère intégrante PIKE© et un spectromètre Perkin Elmer© FRONTIER FT-IR NIR/MIR

Température en K	ε Large bande	ε bande III
280	0.688	0.741
300	0.703	0.751
320	0.717	0.759
340	0.728	0.0.766
360	0.736	0.773
380	0.742	0.779
400	0.747	0.784

TABLE 2.1 – Calcul de l'émissivité totale directionnelle de l'alumine en large bande et bande-III en fonction de la température

$$\varepsilon^{|} = \varepsilon(T,\theta,\varphi) = 1 - \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} s(\lambda)\cdot\rho(\lambda,T,\theta,\varphi)\cdot L_0(\lambda,T,\theta,\varphi)\,\mathrm{d}\lambda}{\int_0^{\infty} s(\lambda)\cdot L_0(\lambda,T,\theta,\varphi)\,\mathrm{d}\lambda} \tag{2.14}$$

où $s(\lambda)$ est la sensibilité du détecteur. Celle-ci apparaît aussi au dénominateur car dans le cas des méthodes réflectométriques on se réfère généralement à une surface étalon qui sert à calibrer le dispositif en passant par la sensibilité du détecteur. Dans notre cas, et pour

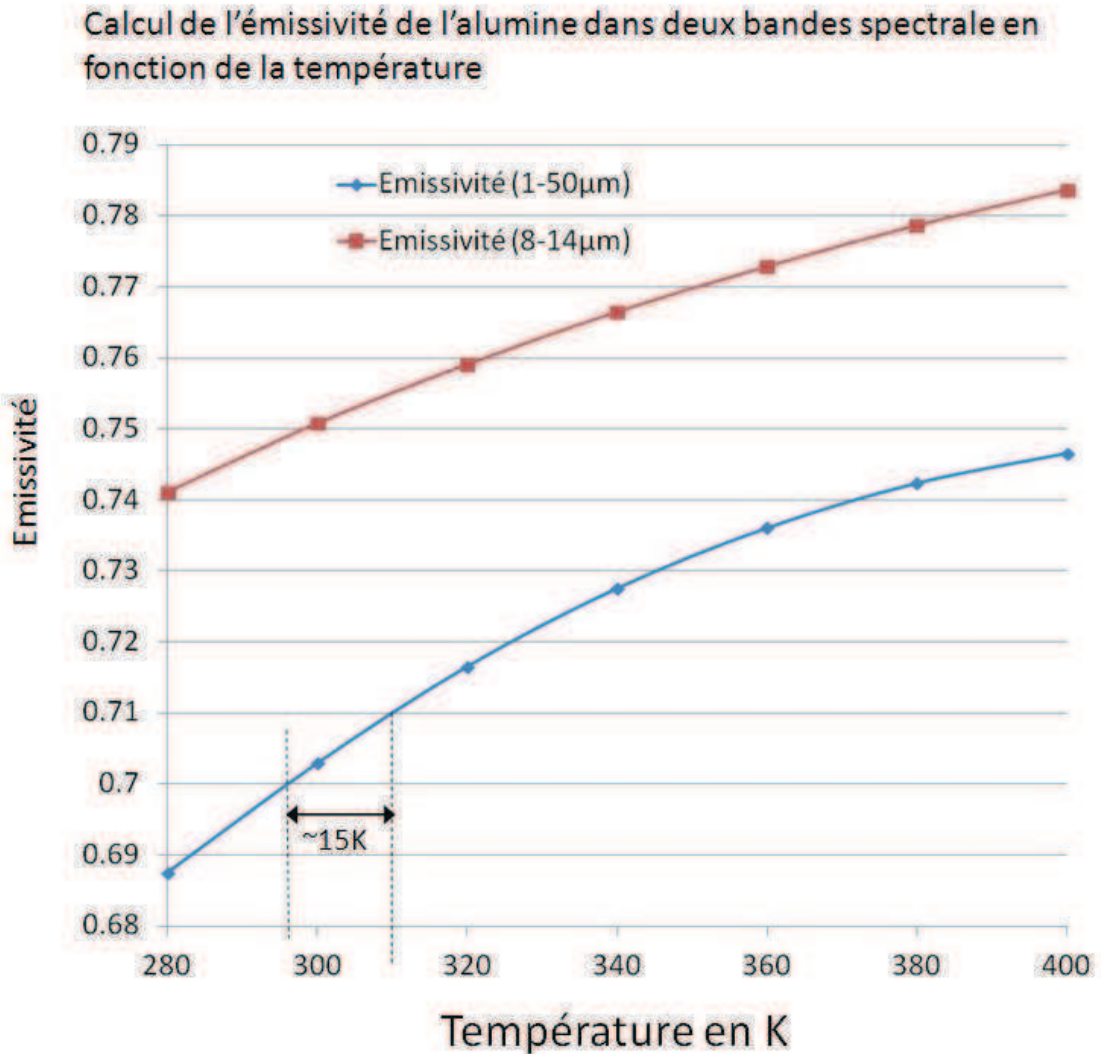


FIGURE 2.15 – Emissivité totale directionnelle de l'alumine en large bande et bande-III en fonction de la température

simplifier l'écriture, le terme $s(\lambda)$ inclut aussi la transmitance de l'optique utilisée devant le détecteur. L'erreur commise dans le cas de détecteurs ayant une sensibilité variable en fonction de la longueur d'onde peut être importante sur des corps non gris. Cette erreur est faible dans le cas de surfaces ayant une réflectance spectrale faiblement variable en fonction de la longueur d'onde. On se réfèrera à [33] pour une quantification de cette erreur. Les détecteurs de flux thermique (détecteurs pyro-électriques, détecteur bolométriques, thermopiles...) ne sont pas concernés par cette erreur car leur sensibilité est très peu variable sur une large plage de longueur d'onde ($1\,\mu$m à $50\,\mu$m).

2.6.4 Erreurs dues à la modulation de la température de la source

Ce cas de figure concerne les méthodes utilisant une méthode réflectométrique impliquant une source modulée. On suppose que la répartition spectrale de la source ne varie pas de manière notable quand les variations de température sont faibles. Cette hypothèse est exacte, cependant avec ces méthodes, on ne mesure pas le flux réfléchi par l'échantillon mais seulement les variations de flux réfléchi. Si T est une fonction périodique du temps, il faut remplacer la température par son expression en fonction du temps : $T(t)$ où t est le temps. Le signal mesuré par le détecteur est donc égal à :

$$S(t) = \int_0^\infty \rho(\lambda) \cdot L(\lambda, T(t)) \cdot d\lambda \tag{2.15}$$

où $L(\lambda, T)$ est la luminance du corps noir pour la longueur d'onde λ à la température T. Cette différence est illustrée sur la figure 2.16.

Puisque l'on ne s'intéresse dans ce cas qu'aux variations périodiques de cette luminance, la mesure est donc proportionnelle à l'amplitude crête à crête notée A mesurée par le détecteur pour des variations de température de ΔT au-dessus de la température minimale (pour des raisons de simplification d'écriture, on suppose que la température varie entre T et $T+\Delta T$) :

$$A = \int_0^\infty \rho(\lambda) \cdot L(\lambda, T + \Delta T) \cdot d\lambda - \int_0^\infty \rho(\lambda) \cdot L(\lambda, T) \cdot d\lambda \tag{2.16}$$

Si l'on mesure le signal correspondant au flux incident, on peut obtenir le coefficient de réflexion total dans la bande spectrale couverte par le détecteur :

$$\rho = \frac{\int_0^\infty \rho(\lambda) \cdot [L(\lambda, T + \Delta T) - L(\lambda, T)] \cdot d\lambda}{\int_0^\infty [L(\lambda, T + \Delta T) - L(\lambda, T)] \cdot d\lambda} \tag{2.17}$$

On voit donc qu'en réalité, on mesure la réflectance avec une source ayant une répartition spectrale égale à la différence de luminance de deux sources de températures différentes. Cette répartition spectrale diffère notablement de la répartition spectrale d'un corps noir à la température moyenne. La figure 2.17 montre la luminance d'un corps noir à 300 K et à 360 K ainsi que la différence de luminance entre deux corps noirs à 300 K et 305 K. Les courbes ont été normalisées pour une meilleure facilité de lecture. On remarque que la répartition spectrale ne suit plus la loi de Planck, mais se rapproche de la répartition spectrale d'un corps noir à 360 K. Pour que cette erreur n'ait qu'une influence négligeable, il faut que l'échantillon soit gris aux alentours de 10 μm pour une mesure de l'émissivité à température ambiante. Cela n'est par exemple pas le cas pour l'alumine comme nous le verrons au chapitre 3.

Ce défaut n'est pas une nouveauté, en effet la norme ASTM E408-71 (Standard Test Method for Total Normal Emittance of Surface Using Inspection-Metre Techniques) en fait état au paragraphe 3. On peut se référer également à [35] où ce type d'erreur est brièvement évoqué.

2.6.5 Erreurs dues à la valeur de l'émissivité de la source

Dans le cas de l'appareil fabriqué par INGLAS comme pour celui développé au CERTES, on a supposé dans un premier temps qu'il n'y avait qu'une seule réflexion sur l'échantillon, et que les parois fortement émissives absorbaient la totalité du flux réfléchi. Cela n'est pas le cas en réalité. Le détecteur reçoit le flux de la première réflexion $\rho \cdot \phi$ où ρ et ϕ sont respectivement le coefficient de réflexion de l'échantillon et le flux émis par les parois de la cavité. Après une réflexion sur les parois ayant un coefficient de réflexion de ρ_p, le détecteur

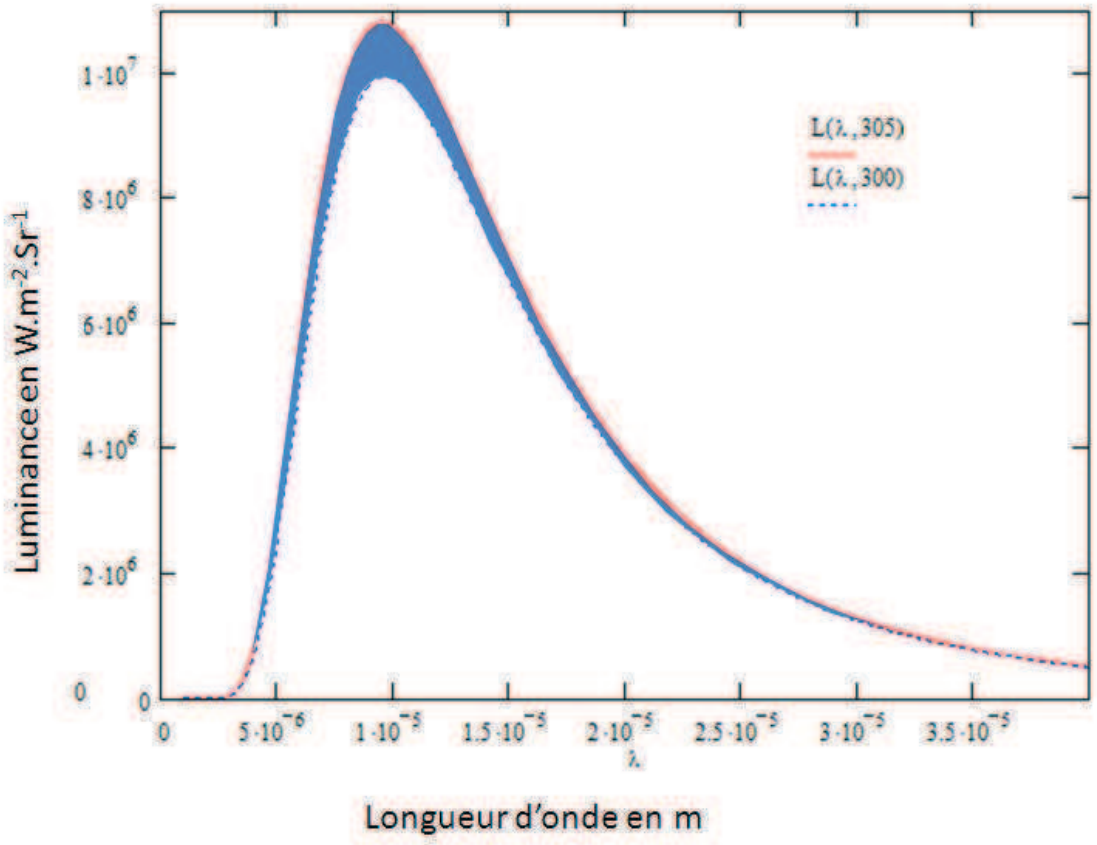


FIGURE 2.16 – Comparaison entre le rayonnement d'un corps noir à 300 K et à 305 K, la différence est illustrée en bleu

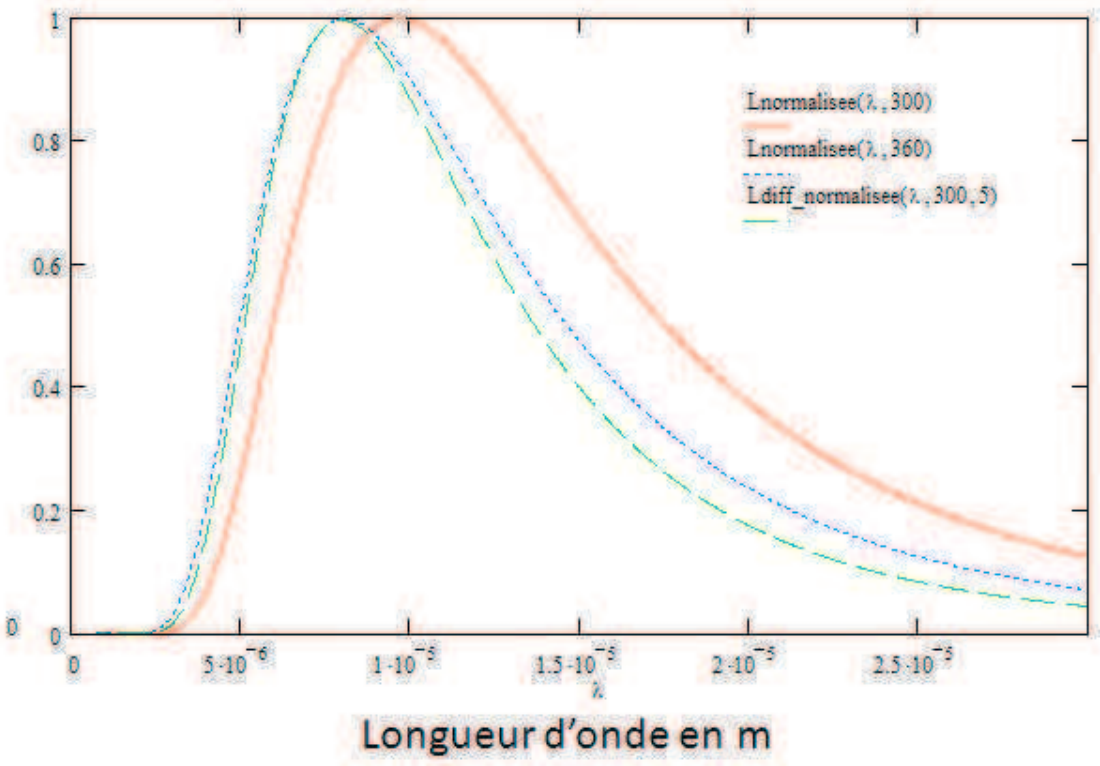


FIGURE 2.17 – Comparaison entre les courbes de rayonnement normalisées d'un corps noir à 300 K, à 360 K et la différence entre deux sources à 300 K et à 305 K

reçoit une autre contribution de $\rho \cdot \phi \cdot (\rho \cdot \rho_p)$ et ainsi de suite. On a donc un flux reçu par le détecteur de :

$$\phi_m = \phi \cdot (1 + \rho \cdot \rho_p + (\rho \cdot \rho_p)^2 + (\rho \cdot \rho_p)^3 + (\rho \cdot \rho_p)^4 + ...) = \phi \cdot \rho_m \tag{2.18}$$

où l'indice m correspond aux valeurs mesurées. On reconnaît dans cette expression les termes d'une suite géométrique et l'on peut donc obtenir une expression de la valeur de ρ_m en fonction de ρ et ρ_p :

$$\rho_m = \frac{\rho \cdot (1 - \rho_p)}{1 - \rho \cdot \rho_p} \tag{2.19}$$

ρ_m est donc toujours surestimé d'une valeur $\Delta\rho$ que l'on a tracée figure 2.18 pour une valeur de $\rho_p = 0.05$. Cette valeur est à ajouter à l'émissivité une fois déduite du coefficient de réflexion. On peut constater que ce biais est maximum pour $\rho = 0.5$ et pour une émissivité des parois faible. Cette valeur $\Delta\rho$ est à ajouter aux valeurs fournies par les émissomètres

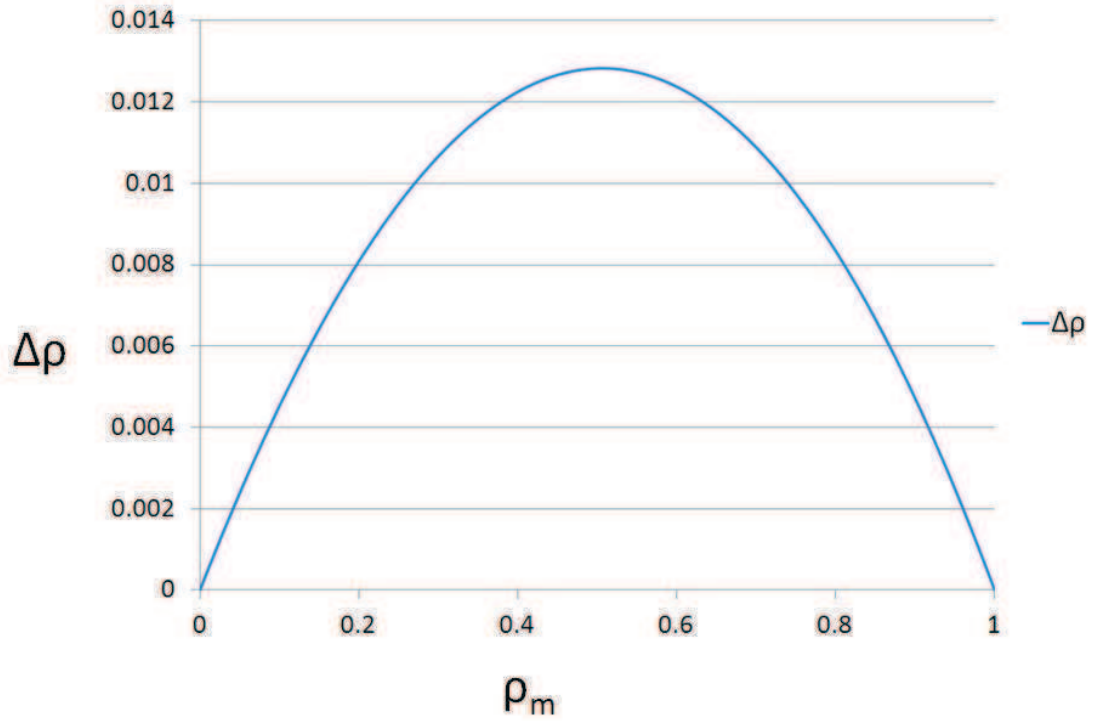


FIGURE 2.18 – Ecart $\Delta\rho$ entre la valeur de la réflectance mesurée et réelle en fonction de la réflectance mesurée ρ_m pour une valeur de $\rho_p = 0.05$

utilisant cette technique de mesure. L'erreur, bien que faible, n'est pas négligeable, et elle est dans le cas de l'émissomètre développé au CERTES comme celui de INGLAS, de 1.3% au maximum.

2.7 Etude des textes normatifs sur la mesure de l'émissivité

Dans cette partie plusieurs normes utilisées pour la mesure d'émissivité sont détaillées. Une seule norme européenne détaille les mesures d'émissivité sur du verre plat. Les normes nord-américaines sont plus nombreuses et non affectées à un domaine industriel spécifique. Les normes dans le domaine de la métrologie ont pris une importance croissante au cours du temps.

2.7.1 Norme ASTM E408

Cette norme intitulée "Standard Test Methods for Total Normal Emittance of Surfaces Using Inspection-Meter Techniques" décrit deux types de méthodes de mesure rapide de l'émissivité pour de larges surfaces. Ces méthodes sont particulièrement utiles pour les contrôles en production. La norme décrit rapidement le principe et les limitations de ces méthodes.

La première méthode est une méthode réflectométrique consistant à éclairer la surface à étudier alternativement par deux demi-cylindres portés à des températures différentes. On mesure le flux réfléchi grâce à une thermopile. C'est donc une méthode réflectométrique modulée.

La seconde méthode est celle utilisée par INGLAS (§2.5.2). On pose une cavité chauffée sur la surface à étudier et l'on mesure le flux réfléchi ; on le compare ensuite à celui réfléchi par une surface de référence. Les causes de limitation des deux méthodes ainsi que les causes d'incertitude sont énumérées dans cette norme.

2.7.2 Norme ASTM C835

Cette méthode intitulée "Standard Test Method for Total Hemispherical Emittance of Surfaces up to 1400 °C" décrit une méthode calorimétrique pour la détermination de l'émissivité totale hémisphérique jusqu'à 1400 °C. La limite basse de température de mesure dépend de la température du cryostat. Les causes d'incertitude sont énumérées dans cette norme ainsi que les limitations de la méthode.

2.7.3 Norme ASTM C1371

Cette méthode intitulée "Standard Test Method for Determination of Emittance of Materials Near Room Temperature Using Portable Emissometers" décrit une méthode de mesure de l'émissivité totale hémisphérique. Cette méthode doit être utilisée uniquement sur des surfaces recouvrant un matériau thermiquement très conducteur. Le principe consiste à mettre

en regard de la surface à étudier deux thermopiles chacune chauffée et recouverte d'une surface d'émissivité très différente. Pour obtenir l'émissivité, on effectue la mesure des flux des deux thermopiles, et l'on en déduit l'émissivité de la surface mesurée. C'est la méthode utilisée par le dispositif commercial AE-AD1 de *Devices and Services*® décrit au §2.5.3.

2.7.4 Norme NF-EN 12898

La norme européenne NF-EN 12898 spécifie un mode opératoire pour la détermination de l'émissivité à la température ambiante des surfaces de verre ou de verre revêtu. L'émissivité est nécessaire pour prendre en compte le transfert thermique par rayonnement des surfaces à la température normale de 283 K dans la détermination de la valeur de U (coefficient de transmission thermique pour une fenêtre en $\mathrm{W \cdot K^{-1}}$) et du facteur de transmission solaire totale des vitrages. Le mode opératoire est fondé sur des mesures spectrophotométriques du facteur de réflexion à incidence proche de la normale sur des matériaux opaques à l'infrarouge. Cette norme n'est pas applicable à des composants de vitrage ayant au moins l'une des caractéristiques suivantes :

a) surfaces rugueuses ou structurées où le rayonnement incident est reflété de manière diffuse ;

b) surfaces courbes où le rayonnement incident est reflété de manière régulière à des angles ne permettant pas d'atteindre le détecteur en utilisant des dispositifs de réflexion régulière ;

c) transparence à l'infrarouge.

Le mode opératoire peut néanmoins être appliqué avec précaution à n'importe quel composant de vitrage si ses surfaces sont plates et non diffusantes et si elles sont non transparentes à l'infrarouge.

Chapitre 3

Un nouveau dispositif de mesure de l'émissivité par réflectométrie modulée

3.1 Le nouvel appareil développé au CERTES

Il existe un certain nombre d'emissomètres commerciaux portables qui peuvent être utilisés sur le terrain. Cependant leurs bandes spectrales ne peuvent être choisies. En outre, ces appareils ne sont pas utilisables sur des surfaces courbes (convexes ou concaves) sans un adaptateur approprié. Ils effectuent généralement la mesure sur une très petite portion de la surface à étudier. Ils ne sont donc pas adaptés à la mesure sur des surfaces hétérogènes comme les bétons bitumineux ou les matériaux de construction rencontrés dans le bâtiment et le génie civil.

C'est pour cette raison que le CERTES a développé le premier appareil de mesure d'émissivité (émissomètre) [25]. Cet appareil met en oeuvre une modulation du flux infrarouge par modulation de la température de la source. 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 (peu fréquents dans les domaines du bâtiment et du génie civil) conduit à un biais sur les mesures sur ces matériaux. Pour pallier à cela, une nouvelle méthode de mesure a été développée,

basée sur la modulation d'une source hémisphérique à une fréquence plus élevée. En outre, la conception choisie 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, à partir duquel est déduite l'émissivité. Ce nouveau dispositif est actuellement protégé par un brevet (FR-1251476).

3.1.1 Principe

La méthode de modulation proposée utilise un écran mobile occultant une source à température fixe. La plupart des dispositifs commerciaux existants sont des écrans circulaires rotatifs n'occultant qu'une seule incidence. Il faut donc réaliser un écran tridimentionnel hémisphérique occultant une source elle-même hémisphérique. De plus, pour mesurer le flux incident, on peut soit mesurer la température de la source, soit 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 mesurer 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.

3.1.2 Contraintes et choix techniques pour la réalisation de l'émissomètre

a. Choix du détecteur

Il existe plusieurs types de détecteurs capables de mesurer un flux infrarouge dans une bande spectrale large. Nous avons volontairement exclu de notre sélection les détecteurs à base de HgCdTe généralement appelés MCT car ils nécessitent un refroidissement à l'azote liquide pour couvrir la bande qui nous intéresse. Il reste donc trois types de détecteurs ne nécessitant pas de refroidissement : les détecteurs pyro-électriques, les bolomètres et les thermopiles. Tous trois utilisent le flux infrarouge pour créer une élévation de température. Celle-ci est ensuite convertie en signal électrique. Les bolomètres sont délicats à mettre en

oeuvre. Quant aux détecteurs pyroélectriques, ils sont généralement constitués d'un élément sensible se comportant comme un transistor à effet de champ. On mesure le flux reçu en mesurant la résistance drain-source. Pour cela, on doit le polariser avec une tension continue. Celle-ci doit être stable et représente une source supplémentaire d'incertitude. Cette tension est généralement source de bruit. En outre, les détecteurs pyro-électriques ne mesurent que des variations de flux et non le flux continu et se comportent comme des dérivateurs. La détectivité est donc fonction de la fréquence de modulation. Pour toutes ces raisons, notre choix s'est porté vers les thermopiles. Celles-ci ont des réponses relativement constantes en fonction de la longueur d'onde. Celle que nous avons choisi est produit par DEXTER©. Sa réponse spectrale varie de 90% à 83% et sa détectivité varie peu en fonction de la température.

b. Constitution de la cavité hémisphérique

La cavité doit être hémisphérique pour permettre de mesurer la réflexion hémisphérique directionnelle. Elle doit être composée d'un écran mobile et d'un écran fixe. Le choix d'une forme cylindrique plutôt que sphérique a été guidé par la facilité d'usinage du dispositif. Cela ne pose pas de problème théorique si l'angle entre la normale de la surface émissive de la source et la direction où se trouve l'échantillon n'excède pas 60°. En effet, en-deçà de cette valeur, la peinture utilisée se comporte comme un corps lambertien, et son émissivité ne dépend pas de l'angle. La peinture utilisée pour recouvrir la source est de la peinture Nextel de la marque 3M©. Celle-ci possède de plus une émissivité spectrale proche d'un corps gris dans la bande utilisée.

c. Choix des fréquences de modulation

La limite haute pour les fréquences de modulation est fixée par la réponse en fréquence de la thermopile. Celle-ci a une fréquence de coupure de 30 Hz. On souhaite obtenir une mesure en quelques secondes et nous devons effectuer l'acquisition du signal sur une centaine de périodes. Il faut ainsi que la fréquence la plus basse de modulation du flux soit compatible avec ces conditions. Les fréquences choisies devront donc être comprises entre 3 Hz et 20 Hz.

La limite haute est réduite pour prendre en compte la dispersion des caractéristiques des détecteurs et des composants électroniques qui seront utilisés.

d. Choix du moteur

Pour entraîner l'écran mobile à une fréquence de rotation de quelques Hz, nous avons exclu les moteurs à balais (ou sans balai) munis d'un réducteur. Ceux-ci ont des fréquences de rotation peu stables ce qui compliquerait le traitement du signal. En effet, l'électronique de conditionnement a une réponse en fréquence variable, ce qui entraînerait une réponse dépendant de la fréquence de rotation. Par ailleurs, ces moteurs présentent un bruit synchrone important aux fréquences où le signal est modulé. Le moteur pas à pas est le seul choix permis pour ce dispositif. Sa fréquence peut être contrôlée avec précision. Par ailleurs, le bruit synchrone de ce type de moteur est produit à des fréquences beaucoup plus élevées.

3.1.3 Description

L'échantillon A est placé sous l'appareil comme on peut le voir sur la Figure 3.1. La source infrarouge hémisphérique B est un cylindre en aluminium fermé par le haut par une plaque N. L'ensemble B-N est 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, sans influence importante.

Sur la Figure 3.3 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 μm à 50 μm et E2 mesure la réflexion dans la bande spectrale de 8 μm à 14 μm 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 ε). 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 3.2). 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 3.5 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 3.4 on peut observer un exemple de mesure sur le terrain.

3.1.4 Traitement du signal

a. 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 3.6.

b. 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

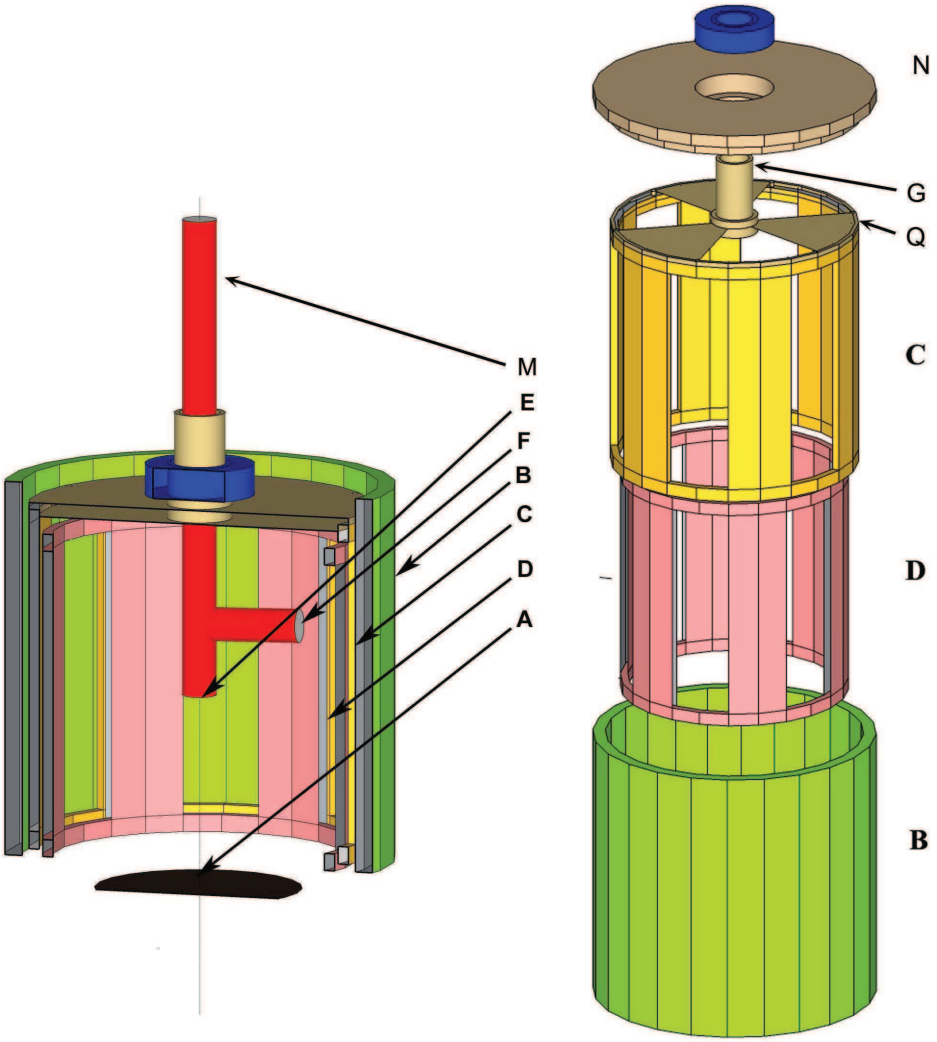


FIGURE 3.1 – Schéma de l'émissomètre. Voir paragraphe 3.1.3 pour les légendes

présenté Figure 3.7. 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. Le choix d'utiliser une FFT plutôt qu'une détection synchrone est motivé par le fait que l'appareil doit pouvoir posséder plusieurs rangées de trous, et qu'il est plus facile d'extraire une série de fréquences sur un spectre que par détection synchrone. Enfin, c'est un moyen efficace de visualiser en permanence le rapport signal sur bruit de la tension délivrée par les thermopiles.

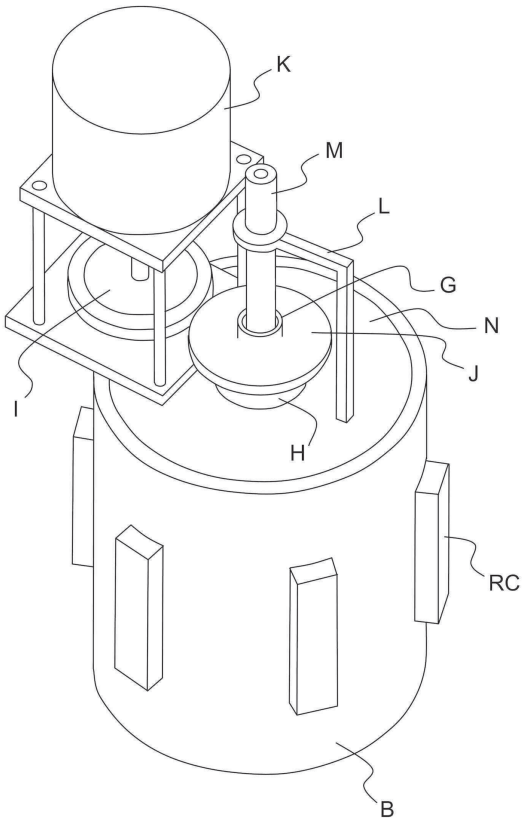


FIGURE 3.2 – Vue d'ensemble de l'émissomètre. Voir paragraphe 3.1.3 pour les légendes

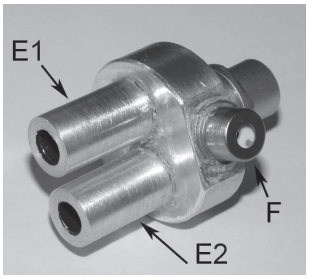


FIGURE 3.3 – Tête de mesure

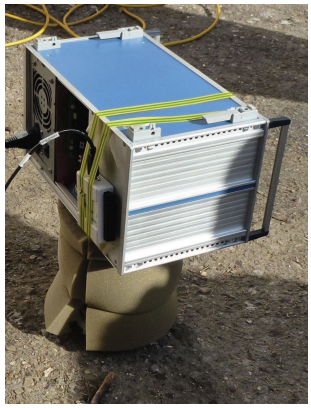


FIGURE 3.4 – Mesure in-situ de l'émissivité d'un revêtement de sol

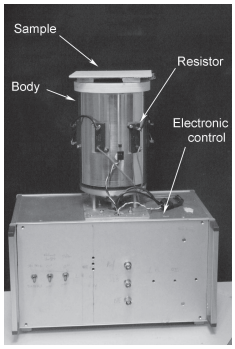


FIGURE 3.5 – Emissomètre EM2

c. Exemples de signaux obtenus

La Figure 3.8 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

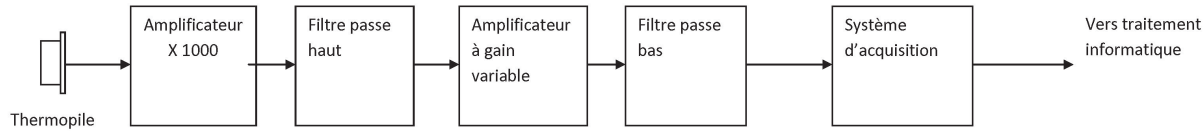


FIGURE 3.6 – Traitement analogique du signal

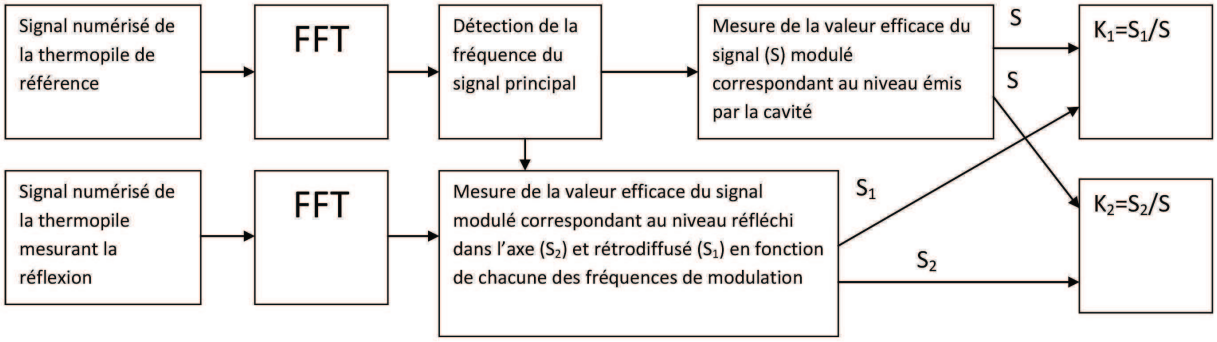


FIGURE 3.7 – Traitement numérique du signal

des flux infrarouges sont de 4.5 Hz et 9 Hz. Sur la FFT du signal (Figure 3.9), on peut observer les pics correspondants aux flux incident et réfléchi de manière diffuse (9 Hz) et spéculaire (4.5 Hz).

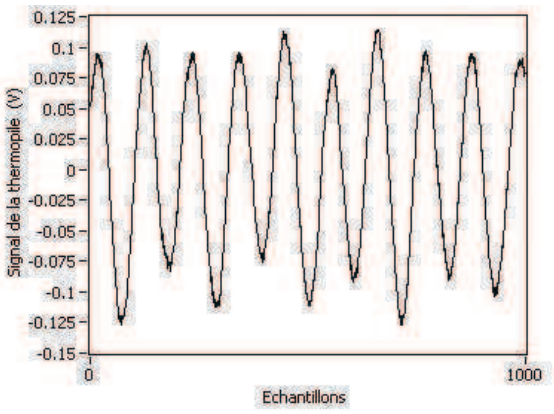


FIGURE 3.8 – Exemple de signal temporel mesuré

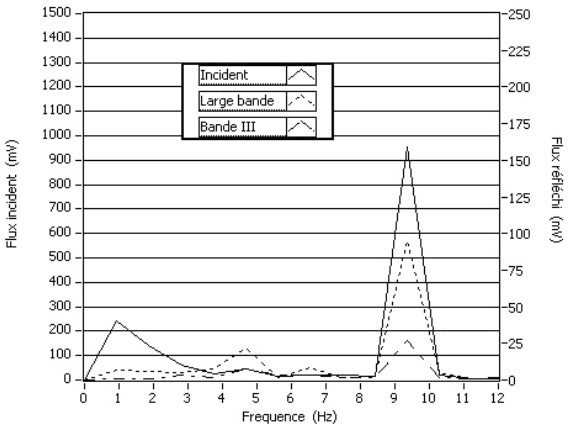


FIGURE 3.9 – Exemple de représentation fréquentielle des signaux mesurés

Echantillon	ϵ Large bande	Incertitude	ϵ Bande III	Incertitude
Nextel	0.976	0.006	0.977	0.005
Alumine	0.742	0.017	0.775	0.015

TABLE 3.1 – Mesures d'émissivité d'échantillons de référence en large bande et bande-III

3.1.5 Extraction des propriétés radiatives à partir des mesures de réflexion

a. 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 doit être calibré. La réflexion totale est la somme de la réflexion diffuse et de la réflexion spéculaire. La somme des deux s'obtient en ajoutant de manière pondérée K_1 et K_2. Pour cela on définit un coefficient a tel que $K_2' = a \cdot K_2$. Le niveau de réflexion K est donc égal à : $K = f(K_1, K_2) = K_1 + K_2'$. Pour trouver la valeur de a correspondant aux caractéristiques géométriques de l'appareil, on effectue des mesures sur des matériaux de réflectances connues. En effet, deux matériaux ayant des coefficients de réflexion directionnelle hémisphérique identique, mais avec une proportion de réflectance spéculaire/diffuse différente, présentent des valeurs de K_1 et K_2 différentes mais l'on doit obtenir la même valeur de K. En résolvant ce système d'équations on obtient la valeur de a. Celle-ci est d'autant plus précise que l'on choisit des échantillons très réfléchissants. Dans notre configuration géométrique, $a = 0.6$. Cette calibration doit être réalisée une seule fois. Cependant l'appareil a été conçu pour permettre de faire évoluer sa géométrie. A chaque modification il est impératif de re-calibrer la valeur de a.

Un étalonnage est effectué à chaque nouvelle campagne de mesures. Pour cela, on utilise une référence de réflectance en aluminium rugueux pour l'étalonnage. On appelle K_{Al} la valeur mesurée avec cet étalon de réflectance ρ_{Al}. On mesure ensuite pour un échantillon inconnu la valeur de K, et l'on en déduit ρ pour celui-ci :

$$\rho = \rho_{\mathrm{Al}} \times \frac{K}{K_{\mathrm{Al}}} = \rho_{\mathrm{Al}} \times \frac{f(K_1, K_2)}{f(K_{1\mathrm{Al}}, K_{2\mathrm{Al})}} \tag{3.1}$$

où $\rho_{\mathrm{Al}} = 0.937$. On vérifie le niveau de bruit incohérent et de bruit synchrone en remplaçant l'échantillon par une boîte se comportant comme un corps parfaitement absorbant. 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.

b. Calcul des incertitudes

Le calcul des incertitudes a été effectué conformément aux documents du BIPM [10]. Après simplification, le calcul d'incertitude est donné par l'équation 3.2 :

$$u(\rho) = \rho \times \sqrt{\left(\frac{u(K)}{K}\right)^2 + \left(\frac{u(K_{\mathrm{Al}})}{K_{\mathrm{Al}}}\right)^2 + \left(\frac{u(\rho_{\mathrm{Al}})}{\rho_{\mathrm{Al}}}\right)^2} \tag{3.2}$$

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

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

Les valeurs des incertitudes-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 identique à celle sur la réflectance.

c. 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 peut en déduire un pourcentage de réflexion spéculaire et de réflexion diffuse, très utile en thermographie infrarouge pour se prémunir des artefacts dûs 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 grâce à une surface réputée parfaitement spéculaire (miroir constitué par du verre flotté recouvert d'une couche d'aluminium déposée sous vide) et une surface réputée parfaitement diffusante (carotte de chaussée routière recouverte de peinture aluminée). Dans un premier temps, on calcule deux nouvelles valeurs K_1'' et K_2''. Ces valeurs ont les propriétes suivantes :

$$K_1'' + K_2'' = K_1 + K_2' \tag{3.3}$$

L'équation 3.3 étant vérifiée pour tous les matériaux et notamment pour le miroir et la chaussée,

$$K''_{1Miroir} = 0 \tag{3.4}$$

$$K''_{2Chaussee} = 0 \tag{3.5}$$

A partir des équations 3.3, 3.4 et 3.5, on détermine les coefficients C, D, E et F tels que :

$$K_1'' = C \cdot K_1 + D \cdot K_2' \tag{3.6}$$

$$K_2'' = E \cdot K_1 + F \cdot K_2' \tag{3.7}$$

Il est à noter que l'équation 3.3 se déclinant pour la chaussée et le miroir, on dispose bien de quatre équations à quatre inconnues.

K_1'' et K_2'' sont donc respectivement proportionnels à l'énergie réfléchie de manière diffuse et spéculaire. On peut donc en déduire le pourcentage de réflexion diffuse et spéculaire. Le tableau 3.2 donne ces pourcentages pour divers matériaux. Etant donné que ce pourcentage n'est pas en relation directe avec la mesure complète de l'indicatrice de réflectivité, on a fait le choix de ne pas donner une incertitude sur ces pourcentages. En effet pour des matériaux très émissifs ($\varepsilon > 0.95$), le niveau de signal réfléchi est faible, et le pourcentage dans ce cas

n'a guère de signification.

Matériau (réflectance)	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

TABLE 3.2 – Pourcentage de répartition entre les réflexions diffuse et spéculaire

3.2 Etude des performances du nouvel appareil

Une fois mis au point, il a été nécessaire de tester les performances de ce nouvel appareil. Pour cela une série de tests nous a permis de mieux caractériser le dispositif. En outre, cela nous a permis d'améliorer ses performances.

3.2.1 Variation de l'étalonnage de l'appareil

Le dispositif mesurant le flux incident envoyé sur l'échantillon, l'étalonnage ne devrait pas varier d'une campagne de mesure à l'autre. Nous avons cependant constaté le contraire. Il est difficile d'utiliser l'appareil en régime thermique permanent. En effet, l'équilibre thermique est atteint au bout de plusieurs heures, ce qui est incompatible avec les objectifs de rapidité.

Pour mieux comprendre ce problème, nous avons effectué une étude dans le temps des variations de température de la cavité servant de source. Le flux modulé étant dû à une différence de température entre l'écran mobile (C sur la figure 3.1) et la source (B sur la figure 3.1), il faut mesurer cette différence de température pour la partie cylindrique et pour la partie haute de la cavité car ces différences de températures respectives ne sont pas forcément identiques. Pour cela nous avons mis en chauffe le dispositif et nous avons mesuré la température de la cavité en plusieurs points grâce à une caméra thermique. La figure 3.10

montre un exemple de mesure. Grâce à cette caméra on peut mesurer la différence de température entre les parties cylindriques modulées à 4.5 Hz (températures mesurées à 39.11 °C et 35.21 °C) et les parties placées au sommet de la cavité modulées à 9 Hz (températures mesurées à 38.36 °C et 35.15 °C). Sur cette image apparaît un point chaud à 40.97 °C correspondant à l'emplacement de la résistance de chauffage. Les valeurs au centième de degré ne sont là que pour se référer à la figure 3.10 et ne correspondent aucunement au niveau d'incertitude de la mesure. On constate que sur la partie cylindrique la température n'est pas homogène. Nous avons pris soin de mesurer la température des différentes parties toujours au même endroit pour mesurer les variations de températures des différentes parties dans le temps et non dans l'espace.

Le tableau 3.3 montre les mesures de températures en fonction du temps. Elles sont portées sur le graphique de la figure 3.11. On a aussi tracé les différences de températures pour la partie haute et la partie cylindrique (figure 3.12). On constate que ces variations de température ne sont pas corrélées. Au cours de l'expérience nous avons ventilé la cavité pour créer une perturbation. Cela s'observe sur les deux graphiques. Si l'étalonnage pour la mesure de K_1 n'est guère perturbé par ces variations, c'est que l'on mesure en permanence le flux émis par le cylindre. Le flux émis par le haut de la cavité n'est pas mesuré et l'étalonnage n'est donc pas stable. Pour être plus rigoureux on devrait donc placer le détecteur F en regard de la cavité pour mesurer les deux flux. Une autre méthode permettant de pallier ce défaut est d'effectuer un étalonnage avant chaque mesure. Cette gène occasionnée est minime puisqu'il ne faut que quelques secondes pour effectuer cette opération.

3.2.2 Modification de la géométrie du système de détection

La première version de l'appareil ne possédait qu'un seul détecteur large bande muni d'un diaphragme. Le but était de déterminer la meilleure configuration possible. Un compromis doit être trouvé entre le niveau de signal, conditionné par l'ouverture du diaphragme, et la discrimination entre le flux réfléchi de manière spéculaire et celui réfléchi de manière diffuse. En effet, si l'on ne diaphragme pas le détecteur, le champ vu par le détecteur est

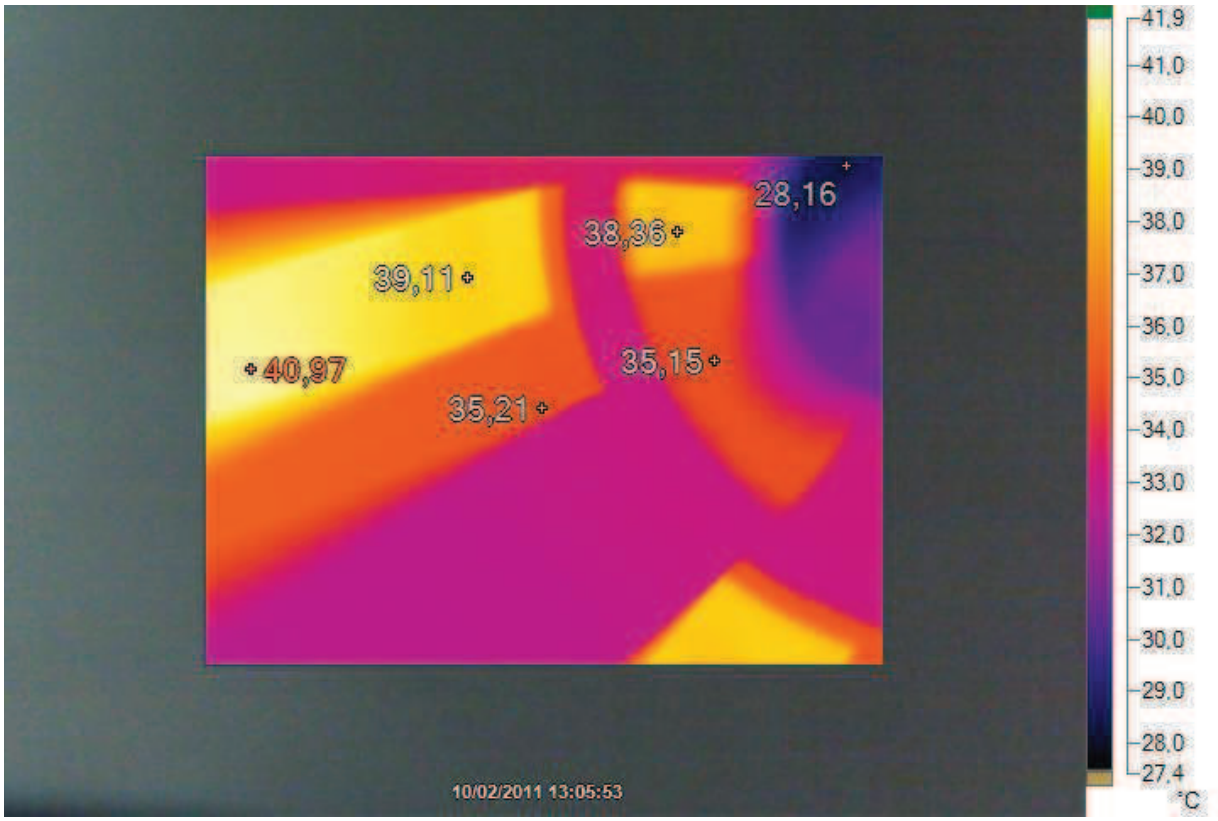


FIGURE 3.10 – Image thermique de la cavité de l'émissomètre

Temps (mn)	Source B partie cylindrique	Ecran mobile partie cylindrique	Source B sommet	Ecran mobile sommet	Ecart de température partie cylindrique	Ecart de température sommet
0	28.12	26.77	26.43	25.35	1.35	1.08
24	37.65	32.95	35.52	32.9	4.7	2.62
32	39.77	35.35	38.48	35.02	4.42	3.46
53	43.88	38.97	41.74	39.01	4.91	2.73
66	45.34	40.36	43.79	40.08	4.98	3.71
111	47.66	42.2	45.55	42.71	5.46	2.84
130	47.9	42.84	46.57	42.71	5.06	3.86
165	49.42	44.82	47.43	44.95	4.6	2.48
296	53.35	49.53	51.91	48.53	3.82	3.38

TABLE 3.3 – Evolution de la température des différentes parties de la cavité de l'émissomètre en °C en fonction du temps

de 80°. Dans ce cas, une surface diffusante reflètera le flux infrarouge venant du sommet de l'appareil avec un niveau sensiblement identique à une surface spéculaire. Il faut donc diaphragmer le champ vu par le détecteur tout en gardant un niveau de signal suffisant. Une

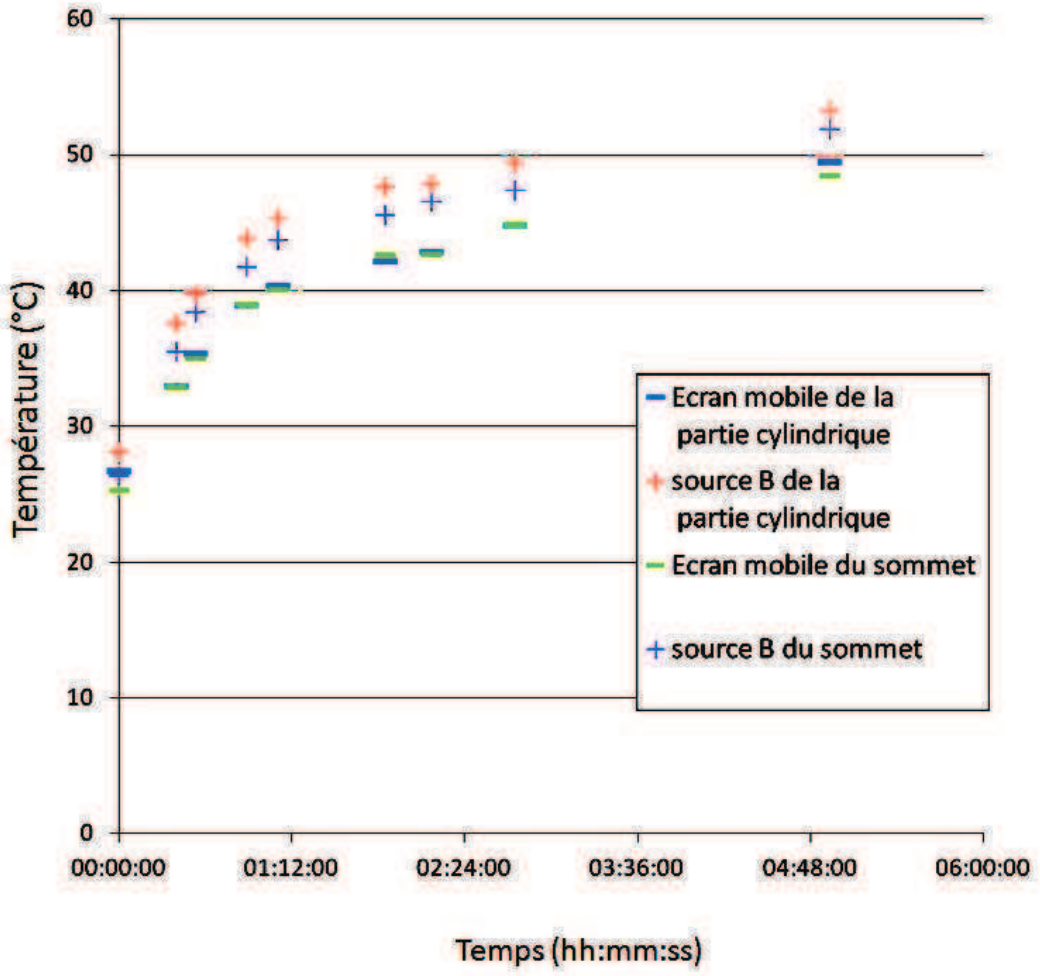


FIGURE 3.11 – Evolution de la température des différentes parties de la cavité de l'émissomètre en °C en fonction du temps

fois le champ angulaire optimal choisi, nous avons décidé de rendre la position en hauteur du détecteur réglable. On peut ainsi choisir le champ angulaire grâce à un diaphragme fixe et la hauteur du détecteur pour optimiser les paramètres de mesure. Grâce à cette possibilité et devant la nécessité de revoir la fabrication de la tête de mesure, il a été décidé de modifier la géométrie du dispositif pour améliorer le rapport signal sur bruit. Le signal mesuré par la thermopile S_{Mesure} est la somme de trois composantes : le signal correspondant au flux réfléchi $S_{Reflechi}$ qui seul nous intéresse, un signal synchrone dû aux réflexions parasites S_{Sync} et le bruit incohérent S_{Bruit}. Aux fréquences concernées, $S_{Reflechi}$ et S_{Sync} s'additionnent en amplitude complexe. Dans notre cas ces deux signaux sont en phase et les valeurs efficaces s'additionnent simplement. A contrario, le bruit étant incohérent, ce sont les puissances

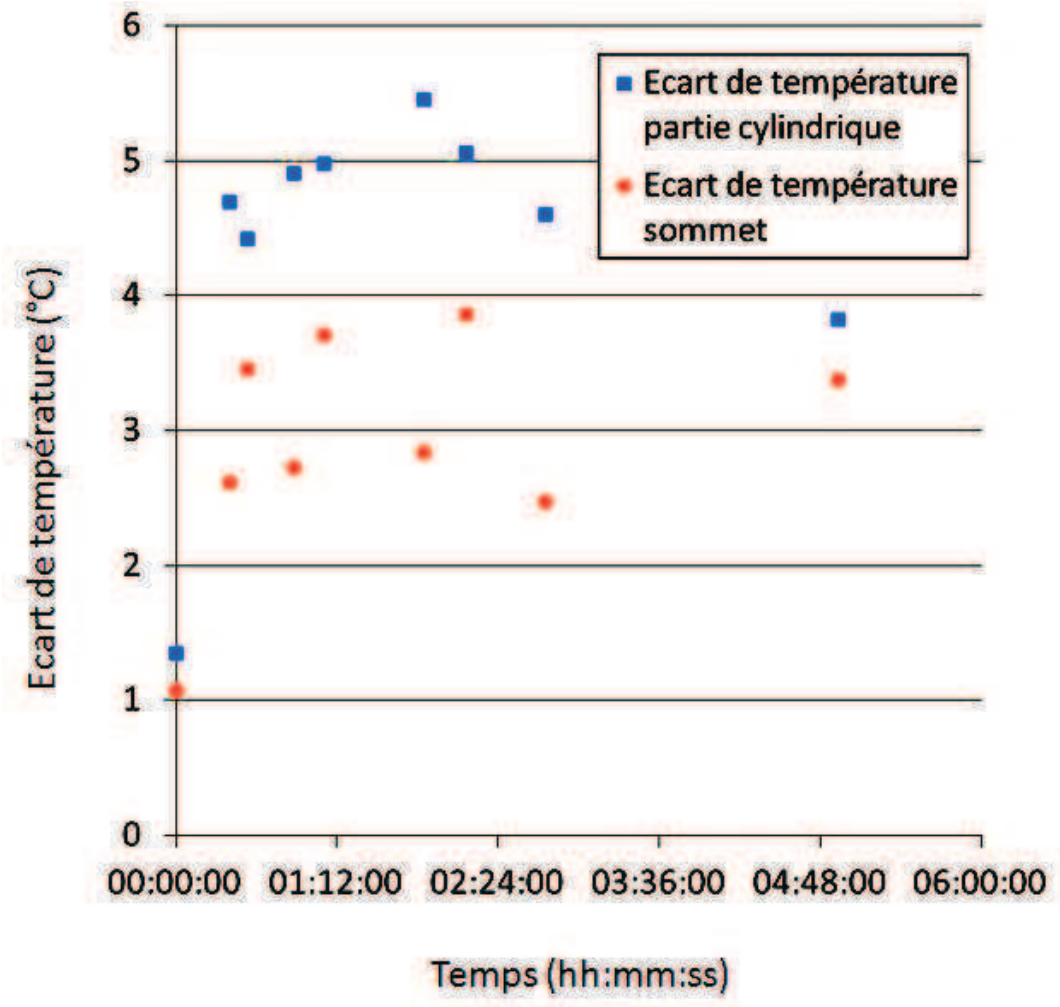


FIGURE 3.12 – Evolution des écarts de température des différentes parties de la cavité de l'émissomètre en °C en fonction du temps

spectrales des signaux électriques qui s'additionnent. Les puissances sont proportionnelles aux valeurs efficaces au carré : $P \propto S^2$. On peut donc écrire la relation suivante :

$$S_{Mesure} = \sqrt{(S_{Reflechi} + S_{Sync})^2 + S_{Bruit}^2} = \sqrt{S_{Reflechi}^2 + S_{Sync}^2 + 2 \cdot S_{Reflechi} \cdot S_{Sync} + S_{Bruit}^2} \tag{3.8}$$

Dans la configuration précédente (configuration A de la figure 3.13) on avait minimisé le signal parasite synchrone, de telle manière qu'un matériau d'émissivité égale à 1 et donc sans réflexion ne donne quasiment aucun signal. Pour cela les détecteurs ne visaient que l'échantillon. Au contraire, dans la seconde configuration (configuration B de la figure 3.13),

nous avons choisi d'additionner volontairement un signal synchrone en visant les parois émettant le flux incident. De cette manière on peut écrire que $2 \cdot S_{Reflechi} \cdot S_{Sync} \gg S^2_{Bruit}$ ce qui donne :

$$S_{Mesure} = \sqrt{(S_{Reflechi} + S_{Sync})^2} \tag{3.9}$$

Ce qui permet d'écrire finalement :

$$S_{Reflechi} = S_{Mesure} - S_{Sync} \tag{3.10}$$

S_{Sync} ne dépend que de la géométrie et peut se mesurer en plaçant un corps noir à la place de l'échantillon. Dans ce cas $S_{Reflechi} = 0$ et donc $S_{Mesure} = S_{Sync0}$. On devra donc soustraire S_{Sync0} à chaque mesure de flux réfléchi. Cette valeur de signal dépendent du flux émis, cette soustraction doit donc s'appliquer aux valeurs de K. Ainsi on peut s'affranchir du bruit incohérent. Cette modification a considérablement amélioré le rapport signal sur bruit, donc l'écart-type des mesures d'émissivité.

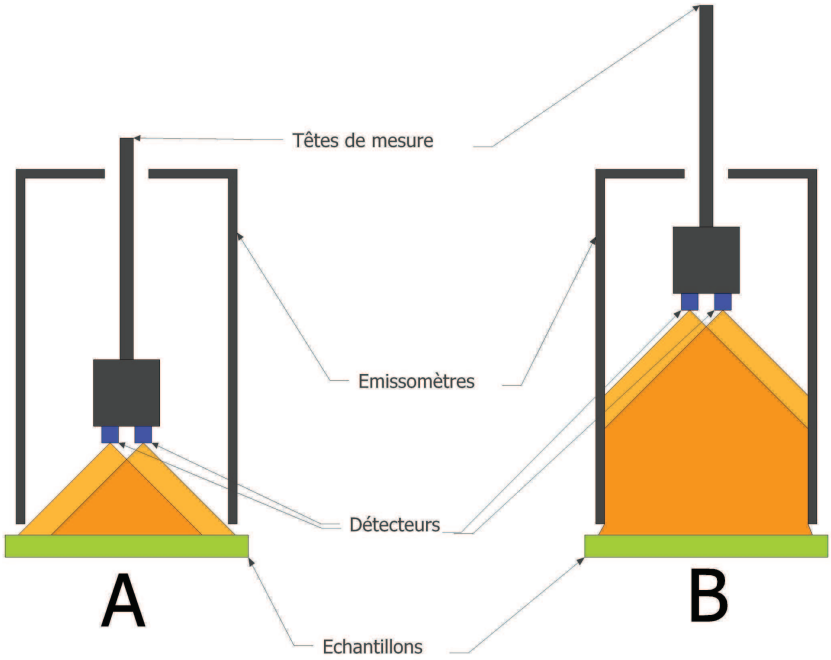


FIGURE 3.13 – Modification de la géométrie de l'émissomètre (en orange, l'angle de vue des détecteurs) : avant modification (A), après modification (B)

3.2.3 Evolution possible de l'appareil

A la suite des premiers essais, il a été envisagé de modifier la géométrie de l'appareil pour le rendre plus performant. Une amélioration possible est de mesurer la réflexion non plus selon deux directions privilégiées mais selon plusieurs directions. Pour cela il faut un écran mobile et fixe ayant plusieurs séries d'orifices. La figure 3.14 montre le cylindre déployé comportant 4 séries de 4, 5, 6 et 7 orifices. Le sommet possède quant à lui 3 orifices. Pour permettre de réaliser le cylindre plus facilement, il a été prévu d'agrandir l'émissomètre. La figure 3.15 montre des vues de ce que pourrait être le nouvel émissomètre.

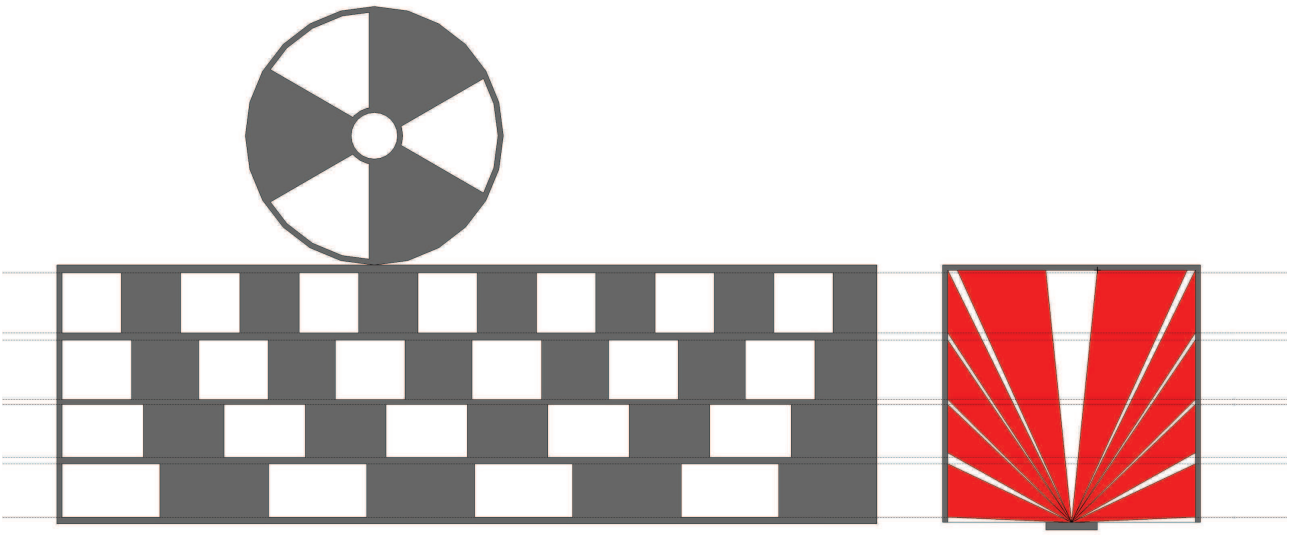


FIGURE 3.14 – Exemple de cylindre déployé

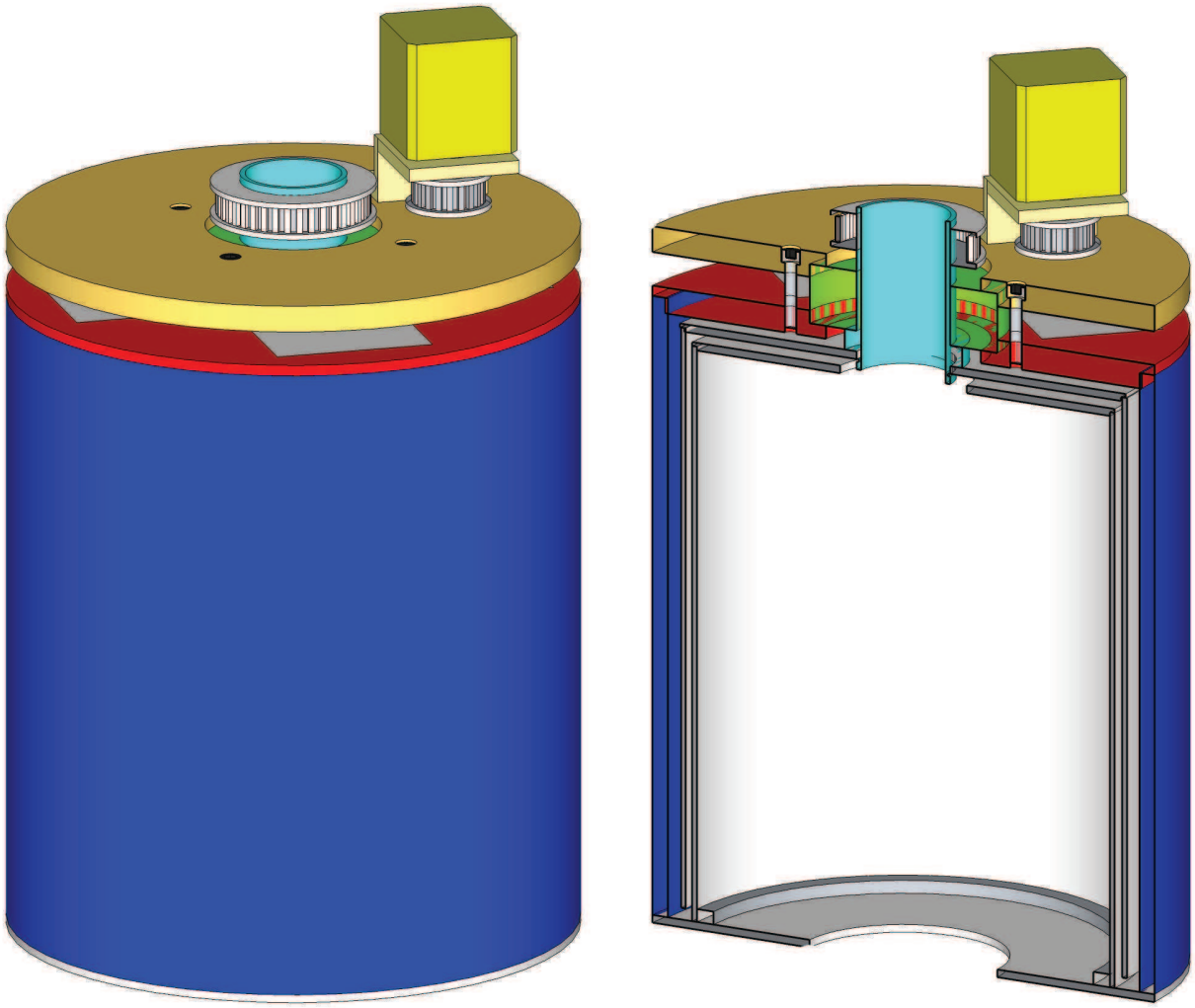


FIGURE 3.15 – Vues en perspective et en coupe d'une nouvelle version de l'émissomètre

Chapitre 4

Mesures effectuées avec le nouveau dispositif

Le développement d'un nouvel émissomètre avait pour but de faciliter la création d'une base de données d'émissivité en bande large et en bande III. Les mesures spectrales sont un complément indispensable à ces mesures, notamment pour extrapoler l'émissivité à des températures pour lesquelles nous n'avons pas effectué les mesures. Nous avons commencé à effectuer des mesures d'émissivité sur des matériaux divers. Nous avons de plus testé le nouveau dispositif *in-situ*.

Dans la première partie sera détaillée la méthode utilisée au laboratoire pour effectuer les mesures grâce à un spectromètre à transformée de Fourier (FTIR) muni d'une sphère intégrante. Cette méthode permet d'effectuer des mesures uniquement dans la bande spectrale de 2 à 18 μm. Cependant il s'agit d'une bonne méthode pour contrôler les mesures effectuées, notamment dans la bande 8 à 14 μm. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle reste une méthode de laboratoire et ne peut être transportée sur le terrain. Les parties suivantes décrivent et présentent les mesures effectuées sur plusieurs séries d'échantillons.

4.1 Mesures effectuées grâce au spectromètre FTIR

Le dispositif utilisé est un spectromètre infrarouge à transformée de Fourier FRONTIER© de la marque Perkin-Elmer© (figure 4.1, image a). Le spectromètre est complété par une sphère intégrante de marque Pike© (figure 4.1, image b) permettant de mesurer la totalité du flux réfléchi. Sur l'image b, on peut observer un bouton permettant de basculer un miroir. Celui-ci permet de passer de la mesure de l'échantillon à la mesure d'une référence interne. Le principe général des sphères intégrantes a été décrit dans la partie 2.4.2. Ce dispositif mesure le coefficient de réflexion directionnel hémisphérique spectral par comparaison avec une référence connue. Cette référence est un revêtement diffusant recouvert d'or. Dans les applications usuelles, on considère la valeur de réflectance pour ce matériau égale à 1. Quand on souhaite une valeur quantitative exacte, il faut connaître sa valeur réelle. Pour cela nous avons demandé au LNE (Laboratoire National d'Essais) d'étalonner notre référence de réflectance. La figure 4.2 montre la réflectance de l'étalon du LNE ainsi que l'étalon que nous utilisons. Pour faciliter l'utilisation de ces mesures on a modélisé ce coefficient en fonction de la longueur d'onde par un polynôme de degré 6 pour pouvoir l'utiliser quelle que soit l'échelle de longueur d'onde (figure 4.3). Le résidu est toujours inférieur à 0.4% (figure 4.4). Pour certaines valeurs de la longueur d'onde, cet écart peut être plus grand quand on se place sur une longueur d'onde d'absorption de l'eau ou du CO_2. En toute rigueur, ces longueurs d'onde doivent être exclues de la mesure ou alors il faut effectuer les mesures sous atmosphère neutre (avec une purge d'azote).

Pour obtenir la valeur de l'émissivité, on doit effectuer une sommation suivant la relation 2.9. Etant donné que l'on effectue les mesures de réflectance spectrale par rapport à notre référence en or, on doit corriger cette relation en prenant :

$$\rho(\lambda, T, \theta, \varphi) = \rho_{mesure}(\lambda, T, \theta, \varphi) \cdot \rho_{Or}(\lambda, T, \theta, \varphi) \tag{4.1}$$

où $\rho_{mesure}(\lambda, T, \theta, \varphi)$ est la valeur mesurée par rapport à la référence en or et $\rho_{Or}(\lambda, T, \theta, \varphi)$ la valeur de la réflectance de cette référence. Cette manipulation n'est pas aisée à mettre en

FIGURE 4.1 – Photo du spectromètre FTIR utilisé : (a) vue générale, (b) détail de l'accessoire à sphère intégrante

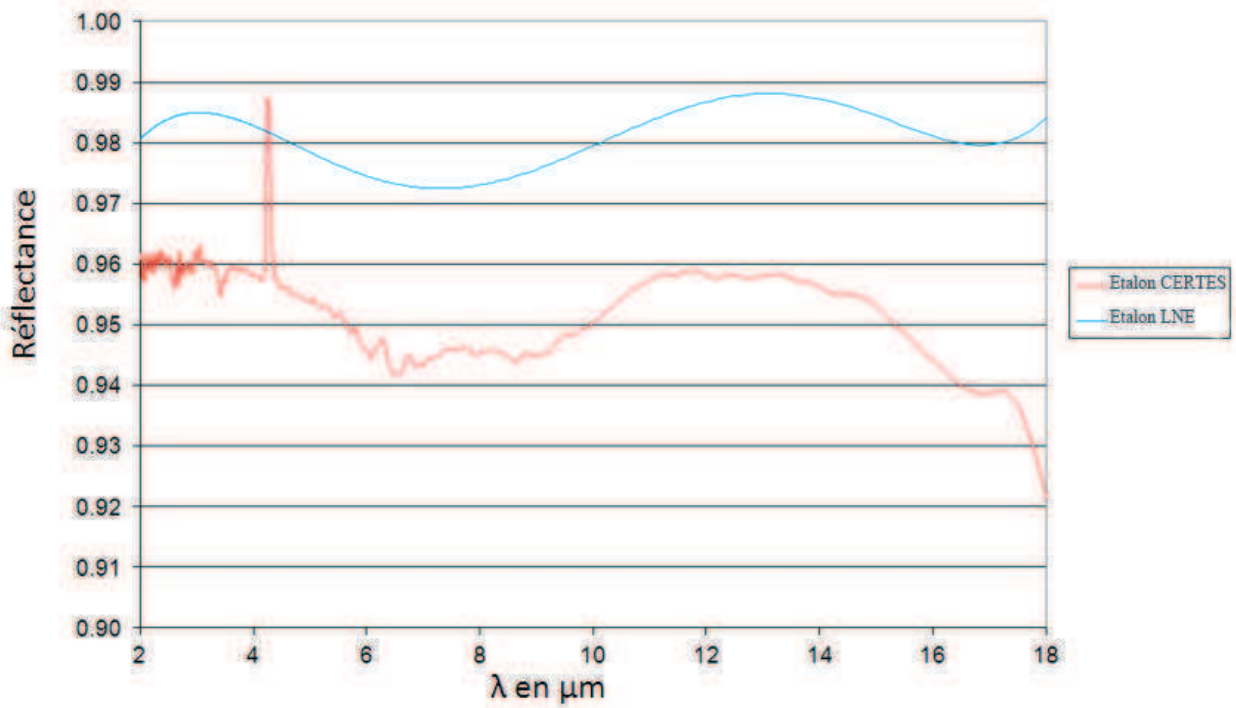


FIGURE 4.2 – Comparaison de la réflectance de l'étalon du LNE et de celui du CERTES

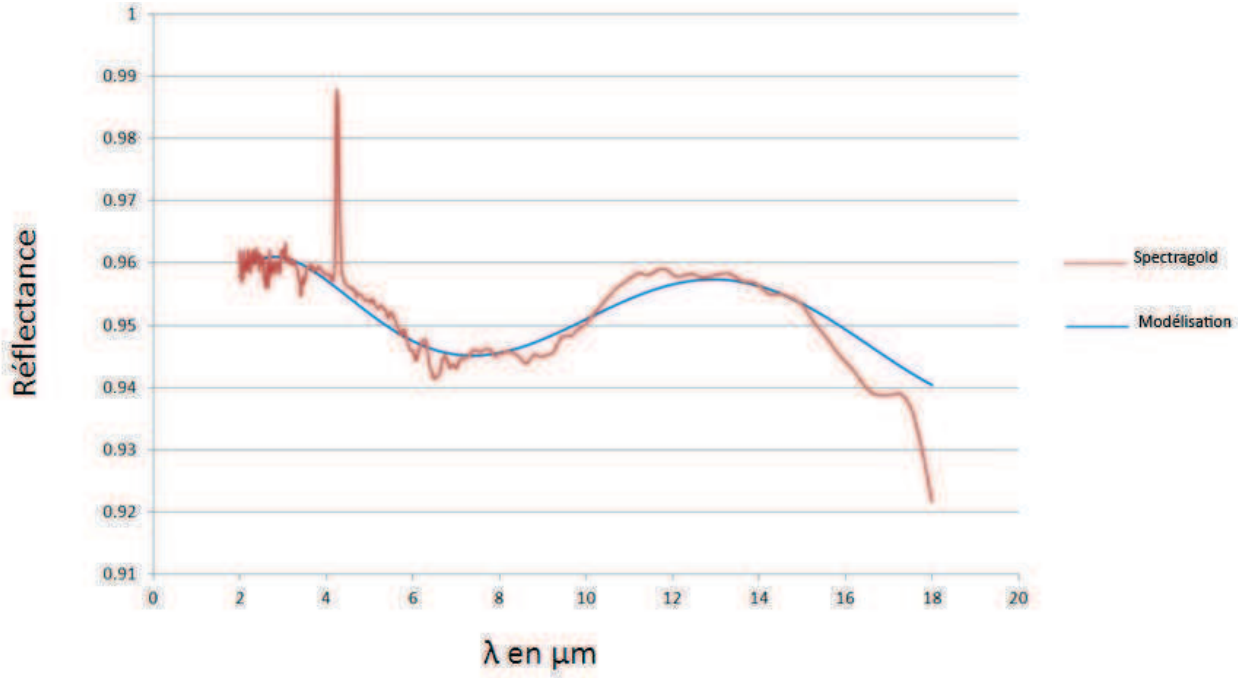


FIGURE 4.3 – Modélisation de la réflectance de référence en or du CERTES par une régression polynomiale de degré 6

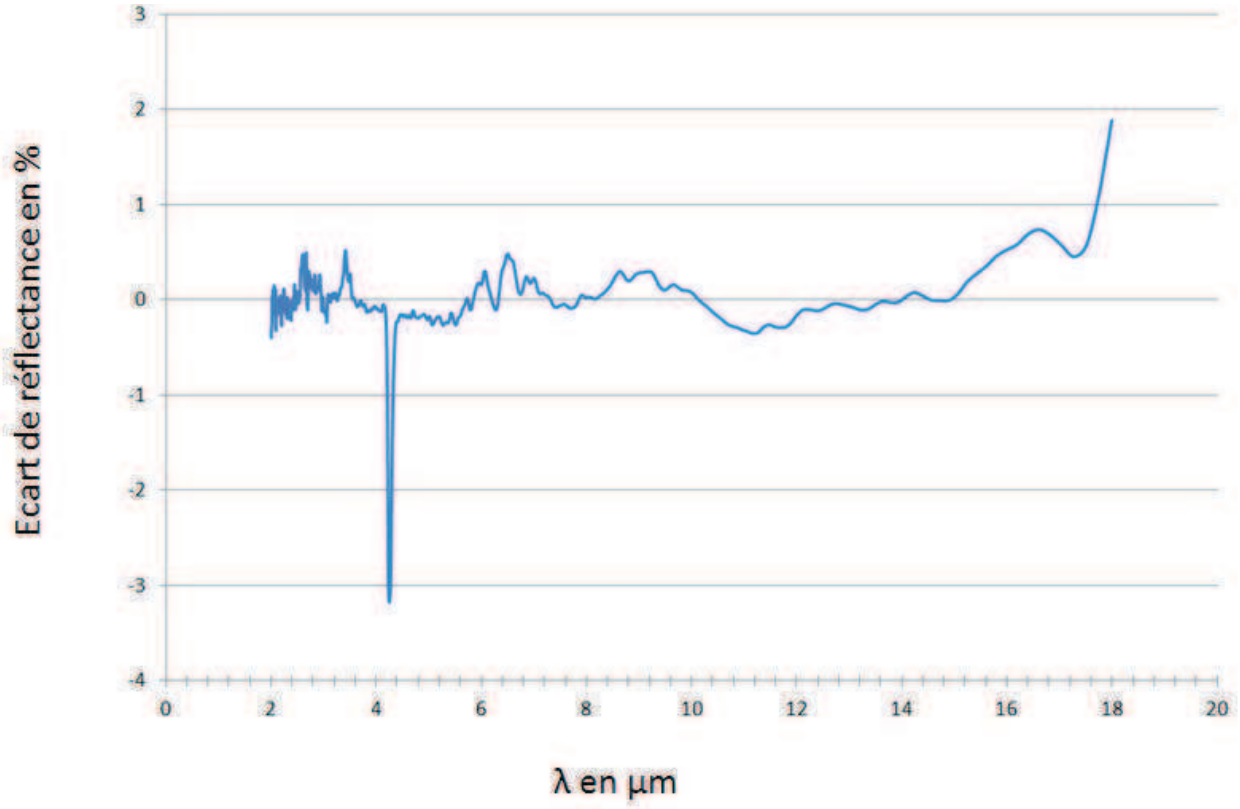


FIGURE 4.4 – Ecart en % entre la modélisation de la réflectance de référence en or du CERTES et sa mesure effectuée par le LNE

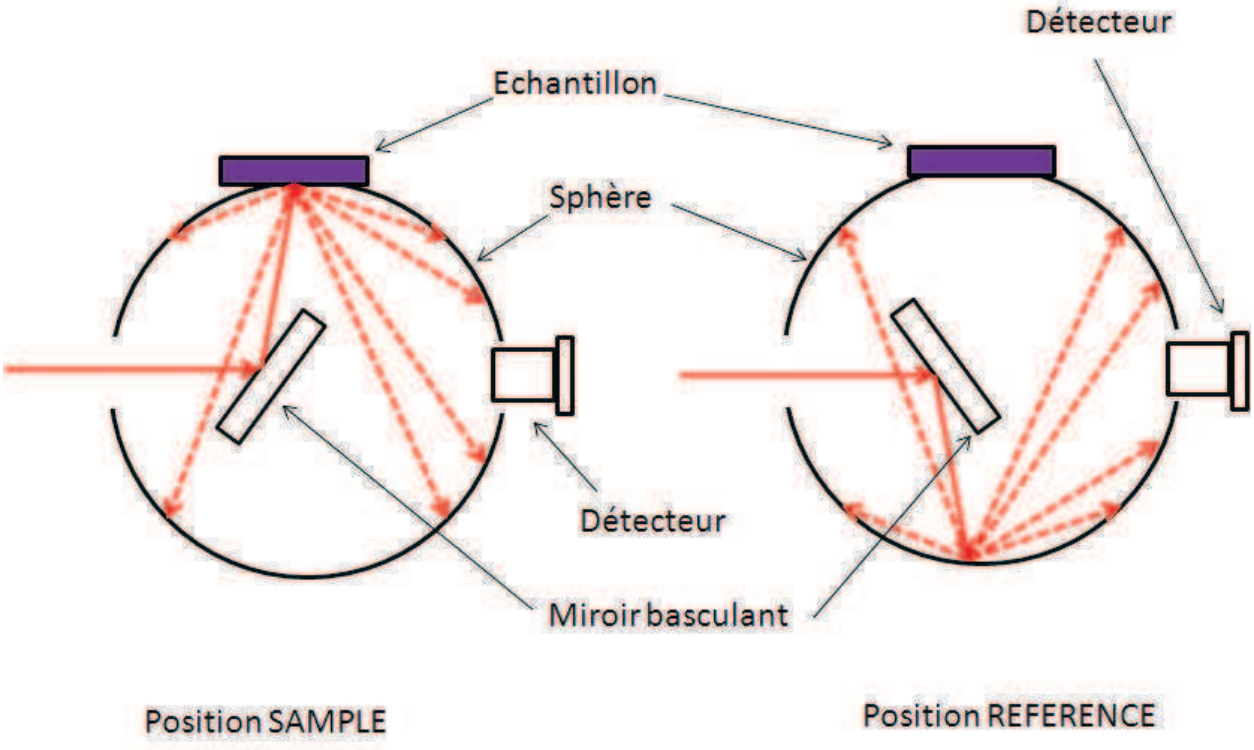


FIGURE 4.5 – Schéma représentant les deux positions du miroir basculant interne de la sphère intégrante Pike©

pratique directement avec le logiciel de pilotage du spectromètre.

4.1.1 Détermination du coefficient de réflectance directionnel hémisphérique spectral absolu avec une sphère intégrante

Les caractéristiques de la sphère intégrante sont modifiées quand on change d'échantillon. En effet celui-ci est partie prenante des caractéristiques de la sphère puisqu'il y a des réflexions multiples. L'importance de cet effet dépend du rapport entre la surface de l'échantillon par rapport à la surface interne de la sphère. Pour connaître les caractéristiques de la sphère en intégrant l'effet de l'échantillon on mesure systématiquement la réflectance d'une surface de référence avec l'échantillon en place. La seule surface de référence que l'on peut mesurer sans enlever l'échantillon est la surface interne de la sphère elle même. Pour cela on peut soit faire pivoter la sphère (solution choisie par le LNE sur son dispositif de mesure) soit dans notre cas utiliser le miroir interne. La figure 4.5 montre les deux positions

possibles du miroir basculant. Dans un cas le faisceau est réfléchi par l'échantillon, dans l'autre cas il est réfléchi par le revêtement de la sphère. Ce revêtement ne changeant pas quand on change d'échantillon, il reste une référence. Il faut mesurer quatre réflectances pour obtenir la réflectance absolue de l'échantillon. Dans un souci de simplification, la dépendance des réflectances en fonction de la longueur d'onde a été omise ; il est cependant clair que toutes ces grandeurs sont spectrales sont et le calcul devra être effectué pour chaque longueur d'onde. Les propriétés de la sphère varient également en fonction de la longueur d'onde. Les différentes grandeurs utilisées sont définies ci-dessous :

$\rho_{Or/SAMPLE}$: mesure de la réflectance du revêtement de référence en or sur la position SAMPLE

$\rho_{Or/REF}$: mesure de la réflectance du revêtement de référence en or sur la position REFERENCE

$\rho_{Ech./SAMPLE}$: mesure de la réflectance de l'échantillon sur la position SAMPLE

$\rho_{Ech./REF}$: mesure de la réflectance de l'échantillon sur la position REFERENCE

ρ_{Or} : réflectance absolue du revêtement de référence en or (valeur mesurée par le LNE)

$\rho_{Ech.}$: réflectance absolue de l'échantillon (ce que l'on cherche à déterminer)

ρ_{Sphere} : réflectance absolue du revêtement de la sphère (valeur inconnue dont on s'affranchit par le calcul)

$A(Or)$: Coefficient de transfert géométrique de la sphère quand la référence est en place

$A(Ech.)$: Coefficient de transfert géométrique de la sphère quand l'échantillon est en place

Les relations suivantes permettent de calculer la réflectance de l'échantillon :

$$\rho_{Or/SAMPLE} = \rho_{Or} \cdot A(Or) \tag{4.2}$$

$$\rho_{Or/REF} = \rho_{Sphere} \cdot A(Or) \tag{4.3}$$

$$\rho_{Ech./SAMPLE} = \rho_{Ech.} \cdot A(Ech.) \tag{4.4}$$

$$\rho_{Ech./REF} = \rho_{Sphere} \cdot A(Ech.) \tag{4.5}$$

Une fois ces quatre grandeurs mesurées, on peut effectuer le calcul et obtenir le coefficient de réflexion absolue de l'échantillon mesuré :

$$\rho_{Ech.} = \frac{\frac{\rho_{Ech./SAMPLE}}{\rho_{Ech./REF}}}{\frac{\rho_{Or/SAMPLE}}{\rho_{Or/REF}}} \cdot \rho_{Or} \tag{4.6}$$

Cette méthode s'applique uniquement si le spectromètre n'a pas de bruit de fond. Pour déterminer si l'on doit corriger les valeurs mesurées, il faut enregistrer un spectre sans échantillon sur la position SAMPLE. Ce spectre correspondant à une réflectance nulle doit être soustrait de chaque spectre brut.

4.2 Etude comparative des méthodes radiométrique et calorimétrique de mesure d'émissivité au CERTES et au LNE

Cette étude a été conduite conjointement avec les deux laboratoires : le LNE (Laboratoire National d'Essais) et le CERTES. L'objectif était de valider les techniques de mesure et de déterminer les méthodes les plus appropriées suivant la nature du matériau à étudier. Le but était aussi d'accroître notre maîtrise sur la mesure d'émissivité et de valider les différentes méthodes. Dans ce but, nous avons étudié quatre échantillons de nature différente couvrant toute la gamme d'émissivité et de degrés de spécularité différents. Après une présentation des échantillons, on détaillera les mesures. Cette étude a fait l'objet d'une publication [37].

4.2.1 Méthodes utilisées

Une méthode directe de mesure de l'émissivité a été utilisée. Il s'agit de la méthode calorimétrique développée au LNE [14]. Les autres méthodes sont des méthodes indirectes. Celle du LNE est une méthode réflectométrique permettant de mesurer la réflectance directionnelle hémisphérique de matériaux opaques de 0.8 μm à 16 μm pour cinq incidences : 12°, 24°, 36°, 48°, et 60° par rapport à la normale [26]. La méthode est absolue et ne nécessite pas de référence de réflectance. La mesure s'effectue en deux étapes. On mesure dans un premier temps le flux incident en plaçant le détecteur face au faisceau. On mesure ensuite le flux réfléchi en plaçant l'échantillon à la place du détecteur. L'ensemble du flux réfléchi est collecté par un système de quatre miroirs focalisant l'ensemble du flux réfléchi vers le détecteur.

Le LNE a aussi effectué des mesures réflectométriques grâce à une sphère intégrante fabriquée par Gigahertz-Optik® d'un diamètre intérieur de 75 mm et effectuant la mesure à 8°. La mesure spectrale est effectuée grâce à un spectromètre FTIR BRUKER-VERTEX©. Les mesures sont effectuées de 1 μm à 17 μm.

Le CERTES a effectué les mesures grâce aux deux émissomètres EM1 et EM2. La description de EM1 à déjà été abordée (§a.). EM2 fait l'objet du chapitre 3.

4.2.2 Les échantillons

Les échantillons choisis couvrent toute la gamme d'émissivité. En outre leur comportement en réflexion est divers, cela va d'échantillons quasi lambertiens à des échantillons dont la réflexion est totalement spéculaire. Les échantillons ont été caractérisés par microscopie électronique à balayage avec le dispositif 6301F de la marque JEOL© (figure 4.8). On peut observer les surfaces de ces échantillons à différents grossissements sur les figures 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 et 4.13.

Sur la figure 4.10 on peut constater qu'il reste des cristaux incrustés lors du sablage de l'échantillon d'aluminium. Ils sont constitués d'alumino-silicates. Les échantillons d'aluminium poli et sablé sont issus de la même tôle de 10 mm d'épaisseur et l'analyse au microscope

électronique nous permet de connaître exactement la composition de l'alliage : 97.2% d'aluminium et 2.8% de magnésium. Pour la peinture aluminium, le microscope électronique à balayage est peu sensible aux éléments légers comme le carbone, principal constituant de la résine qui compose cette peinture. Cette résine n'est donc pas observée, et l'on voit directement les particules d'aluminium en dispersion dans ce liant (figure 4.12 et 4.13). On peut constater que ces particules ont une taille de l'ordre de 10 μm, et sont constituées sous forme de feuilles, et non de limaille. Les échantillons ont été caractérisés aussi par profilomètrie interférométrique avec le dispositif de la figure 4.6. La profilométrie interférométrique permet d'extraire des profils de surfaces. Les rugosités R_q et R_a sont calculées ainsi :

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} \left(Z_i - \overline{Z}\right)^2} \tag{4.7}$$

$$R_a = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} |Z_i - \overline{Z}| \tag{4.8}$$

où Z_i représente les altitudes de la surface mesurée. La figure 4.7 présente les profils de surface sur une coupe significative en termes de mesure de rugosité. On a pris soin de placer la ligne de coupe sur des singularités (mise en évidence de rayure, aspérité...). Les valeurs de rugosité sont calculées par moyenne sur plusieurs coupes. Ces mesures ont été effectuées par Patrick Ausset au laboratoire inter-universitaire des systèmes atmosphériques (LISA) à l'UPEC. Les valeurs de rugosité (calculées suivant la norme ANSI B46.1) ainsi que le ratio de flux spéculaire/diffus des échantillons sont portés dans le tableau 4.1. Les mesures de ratio spéculaire/diffus ont été calculés selon la méthode décrite au 3.1.5. Des images 3D de certains échantillons donnent des informations sur la structure des surfaces (figure 4.14).

4.2.3 Résultats des mesures

Pour comparer les mesures d'émissivité hémisphérique avec les mesures d'émissivité directionnelle normale, on a utilisé les abaques des figures 1.8 et 1.10.

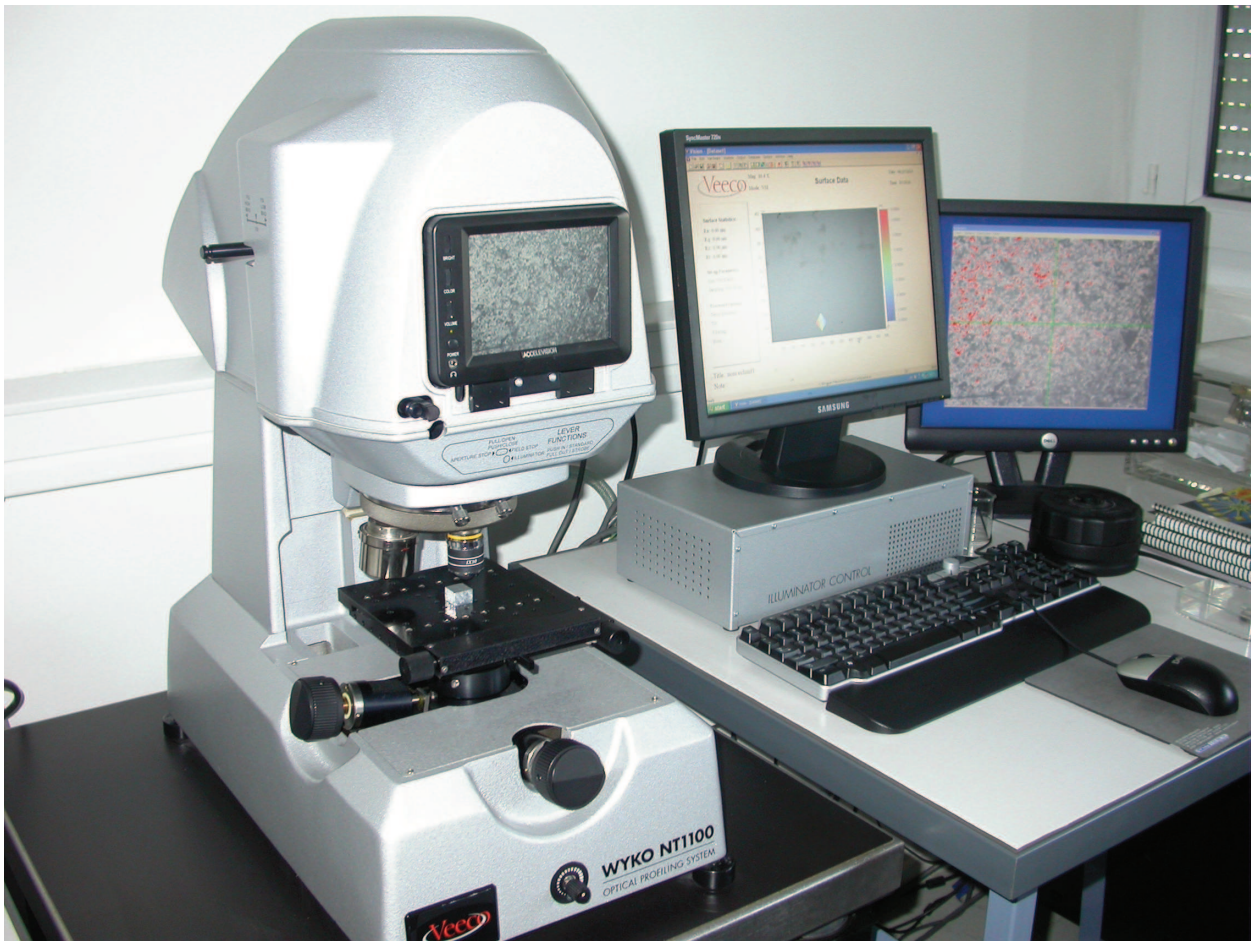


FIGURE 4.6 – Profilomètre NT-1100 de VEECO©

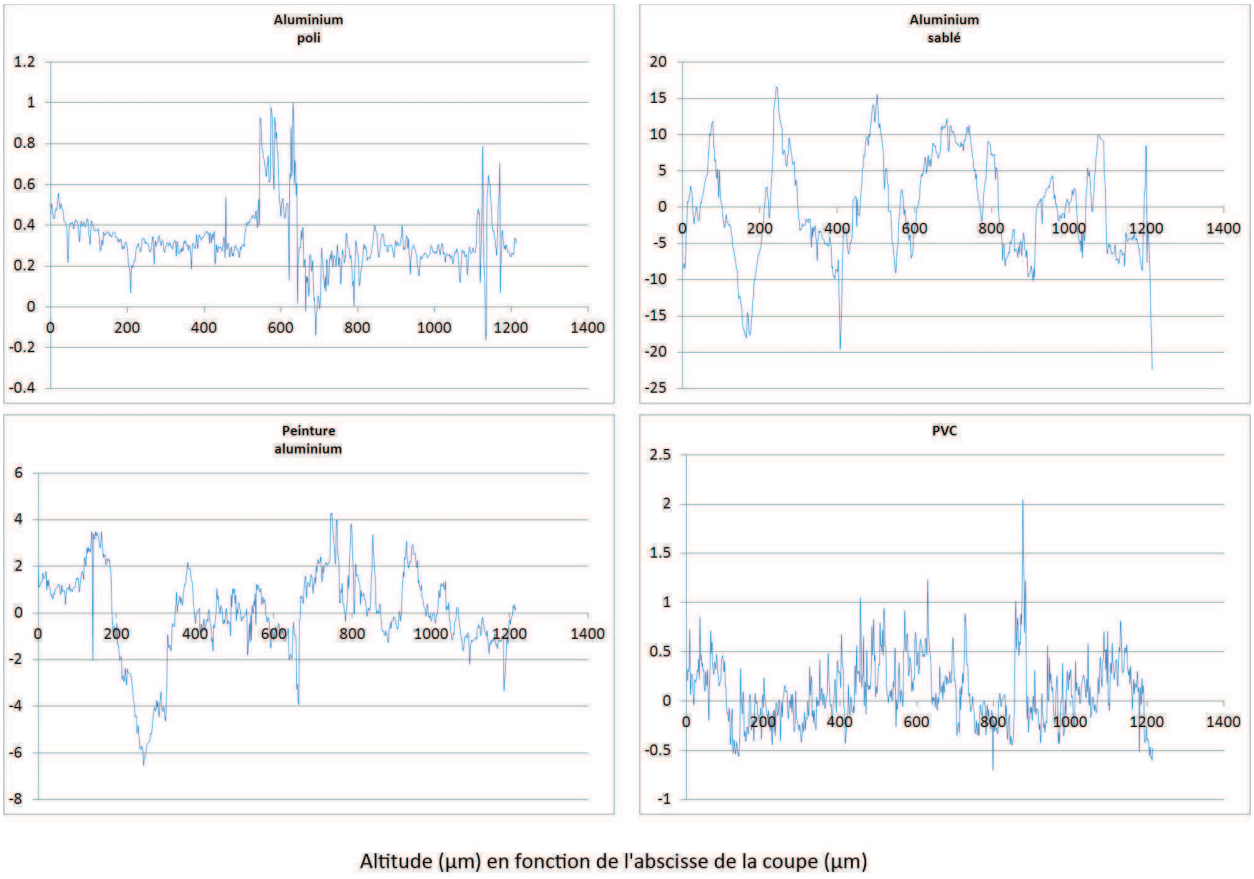


FIGURE 4.7 – Profils des différents échantillons mesurés avec le profilomètre NT-1100 de VEECO©

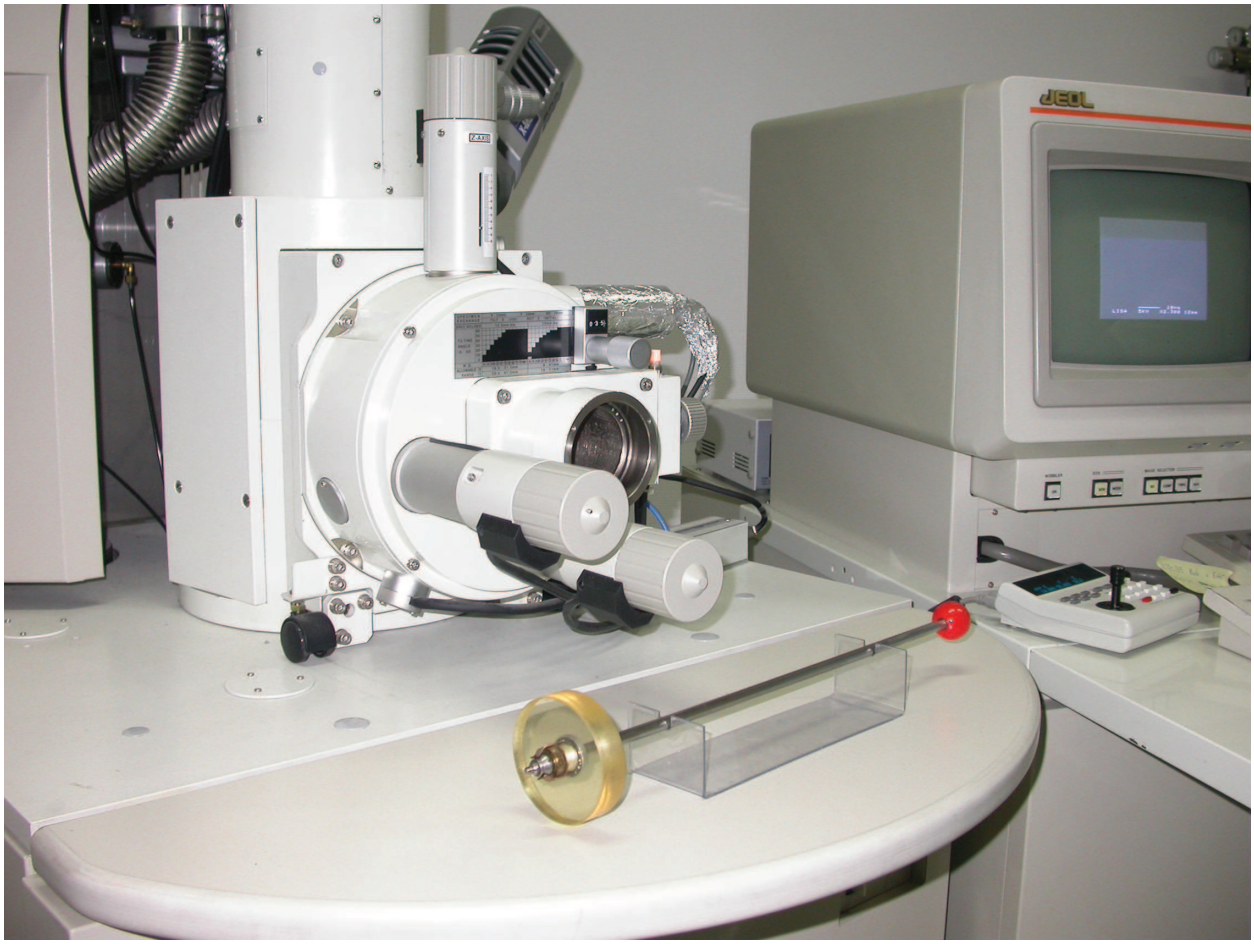


FIGURE 4.8 – Microscope électronique à balayage du LISA (Laboratoire Inter-universitaire des Systèmes Atmosphériques)

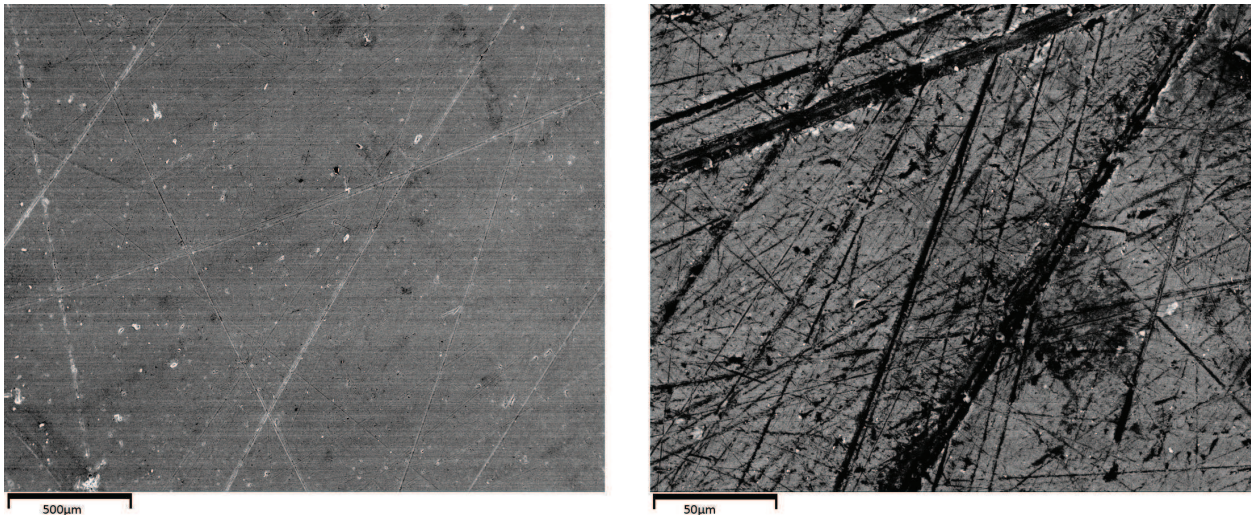


FIGURE 4.9 – Aluminium poli : image de microscopie électronique à balayage à deux grossissements différents

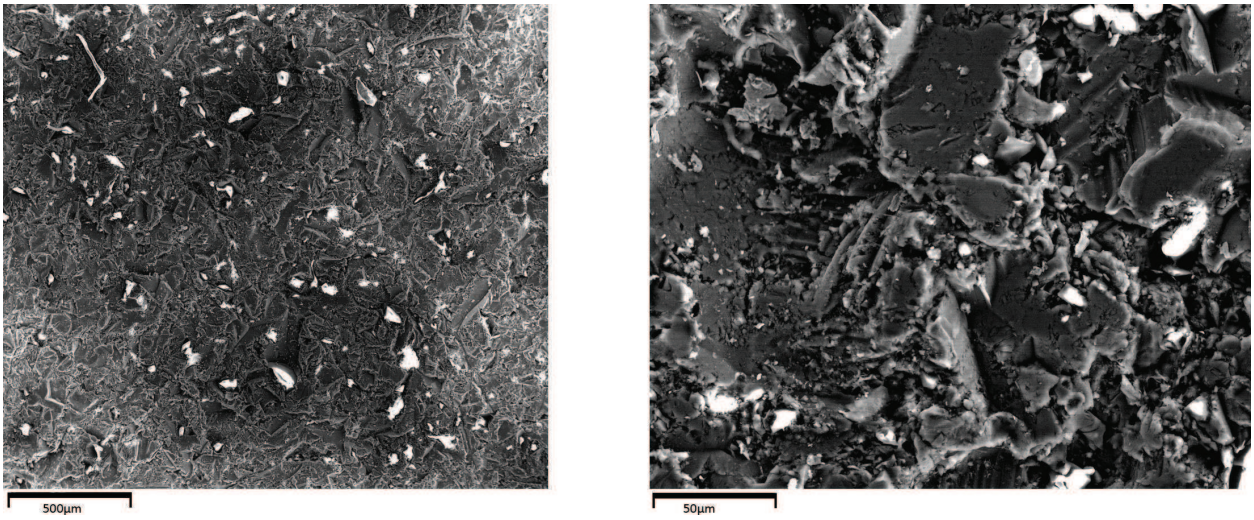


FIGURE 4.10 – Aluminium sablé : image de microscopie électronique à balayage à deux grossissements différents

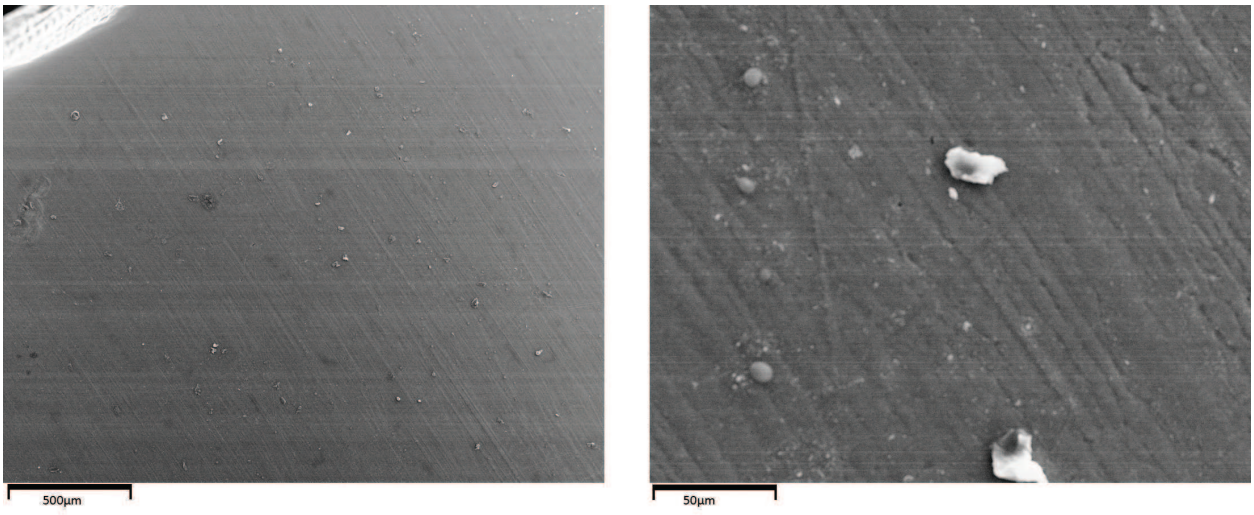


FIGURE 4.11 – PVC : image de microscopie électronique à balayage à deux grossissements différents

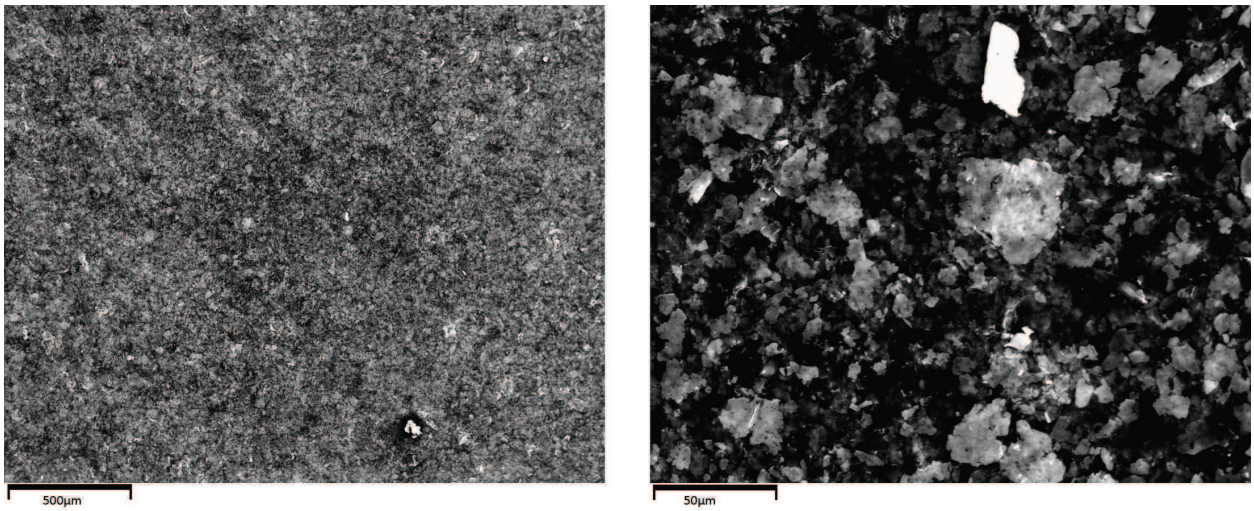


FIGURE 4.12 – Peinture aluminium : image de microscopie électronique à balayage à deux grossissements différents

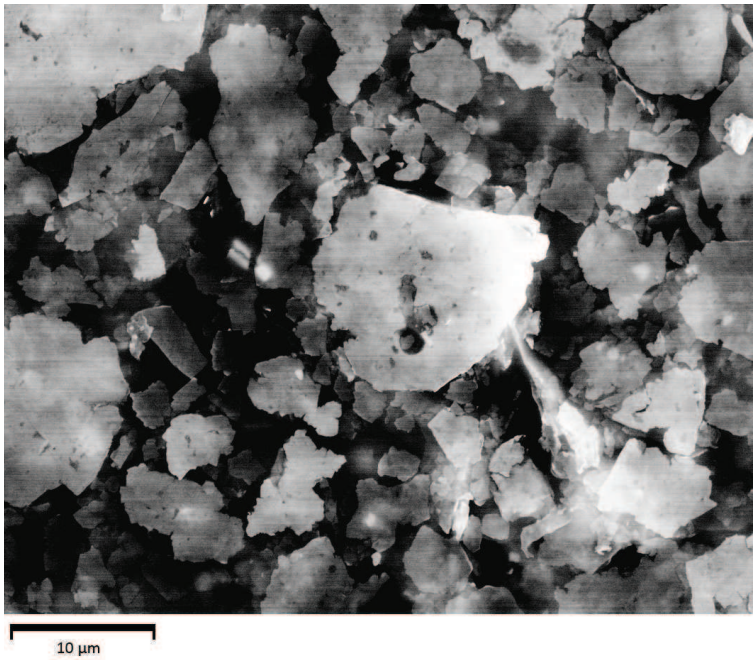


FIGURE 4.13 – Peinture aluminium : image de microscopie électronique à balayage à fort grossissement

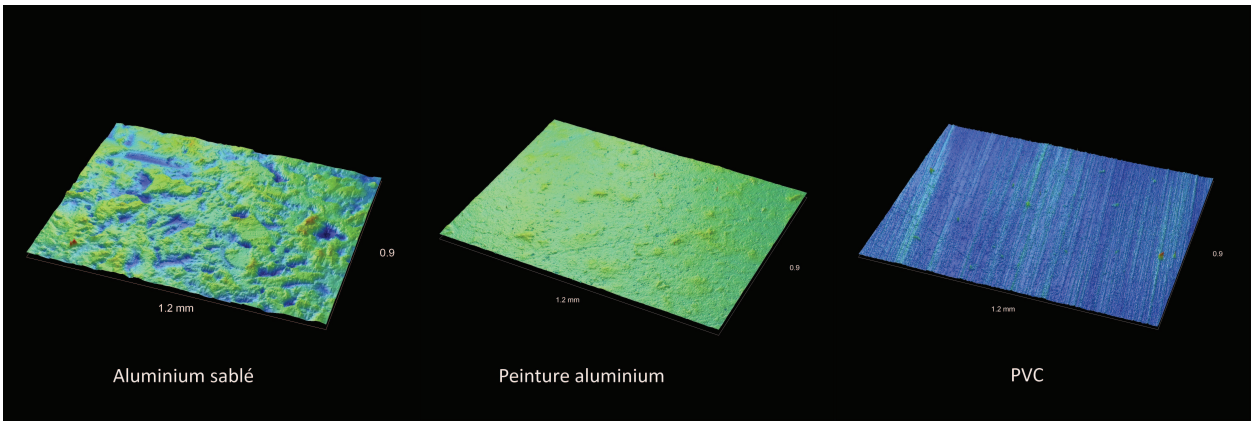


FIGURE 4.14 – Image profilométrique des surfaces étudiées

a. Mesures spectrales

Les mesures spectrales de 2 μm à 20 μm sont représentées sur la figure 4.15. Ces mesures ont été effectuées sur les échantillons utilisés lors des mesures calorimétriques du LNE. En effet, chaque dispositif de mesure a nécessité des échantillons de tailles différentes. Pour la méthode calorimétrique, il est nécessaire d'utiliser deux échantillons de même nature. Les deux de chaque nature ont été mesurés au spectromètre. On peut constater que les mesures sont identiques pour les deux échantillons de même nature pour l'aluminium poli, la peinture aluminium et le PVC. Par contre, le sablage de l'aluminium a donné des échantillons très dispersés en réflectance. Ces échantillons ont été par la suite retirés de l'étude.

Echantillon	Rugosité en μm		Ratio en %	
	R_q	R_a	Diffus	Spéculaire
Aluminium poli	0.18	0.15	0	100
PVC	0.32	0.25	1	99
Aluminium sablé	8.9	6.6	100	0
Peinture aluminium	1.5	1.1	52	48

TABLE 4.1 – Propriétes des échantillons utilisés pour l'étude comparative sur les mesures d'émissivité au CERTES et au LNE

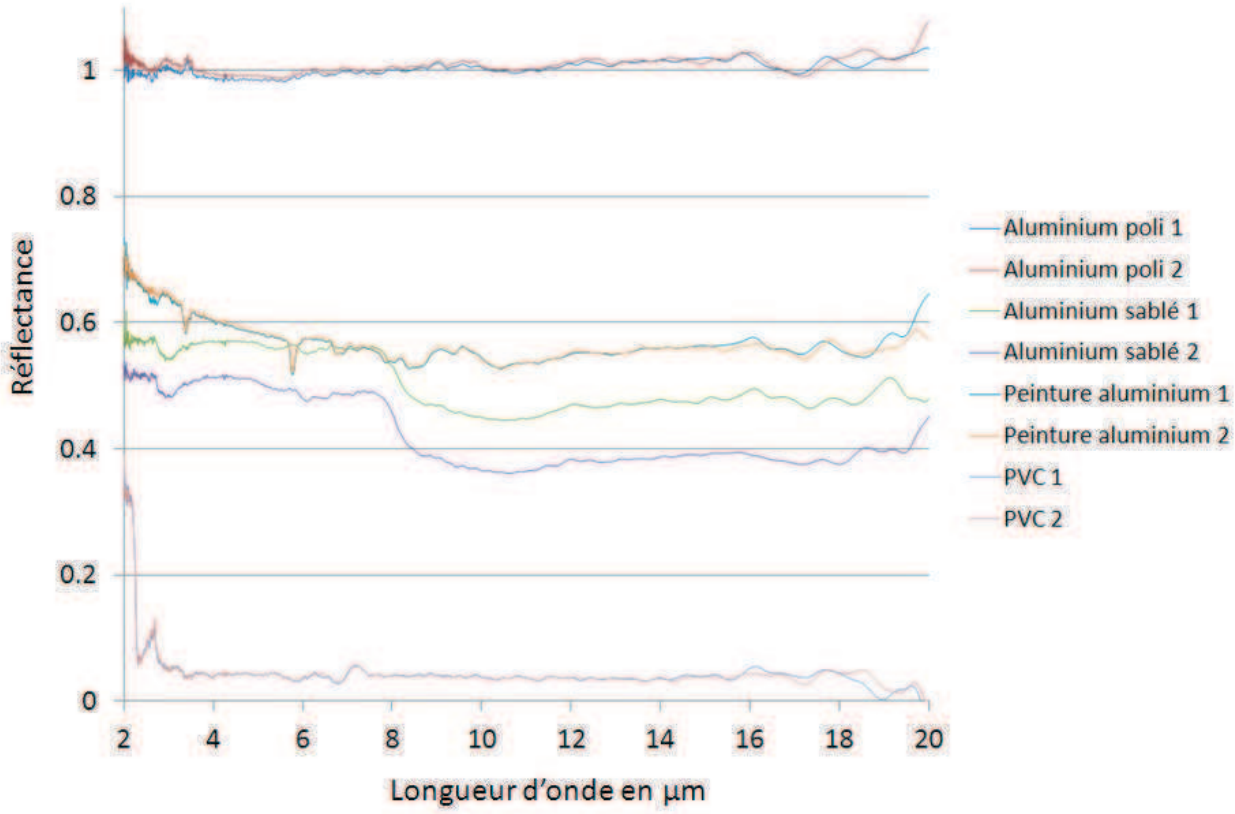


FIGURE 4.15 – Spectres de réflectance des échantillons utilisés dans l'étude comparative (réflectance en fonction de la longueur d'onde)

	Mesures LNE		Mesures CERTES		
	Méthode calorimétrique	Méthode radiométrique	EM1	EM2	Méthode spectrale
Aluminium poli	0.057 +/- 0.003	-0.015 +/- 0.080	-0.140 +/- 0.089	0.050 +/- 0.042	-0.01
Aluminium sablé	0.444 +/- 0.008	0.377 +/- 0.055	0.530 +/- 0.033	0.522 +/- 0.027	0.58
Peinture aluminium	0.404 +/- 0.007	0.403 +/- 0.056	0.357 +/- 0.065	0.439 +/- 0.021	0.45
PVC	0.839 +/- 0.100	0.899 +/- 0.070	0.891 +/- 0.028	0.893 +/- 0.014	0.89

TABLE 4.2 – Tableau comparatif des mesures d'émissivité effectuées au LNE et au CERTES

b. Mesures avec les émissomètres EM1 et EM2

Ces mesures ont été effectuées au CERTES indépendamment des mesures effectuées au LNE. Les calculs d'incertitudes menés pour une série de mesures donnent une bonne idée de la répétabilité de celles-ci sur une même série. Cependant, pour avoir une valeur plus proche de la réalité, nous avons effectué plusieurs séries de mesures sur plusieurs semaines. Cela permet de prendre en compte le manipulateur et les conditions de mesures non prises en compte dans le calcul d'incertitude. Nous avons ensuite fait la somme quadratique des incertitudes types de ces séries avec l'incertitude-type de l'étalon de mesure que nous utilisons. Ces valeurs sont intégrées au tableau 4.2.

c. Résultats de l'étude

Le tableau 4.2 récapitule l'ensemble des mesures effectuées par les deux laboratoires. Dans ce tableau, les mesures d'émissivité normales ont été converties en émissivité hémisphérique. Les mesures spectrales sont portées dans ce tableau sans incertitude. En effet, celle-ci n'étant faites que sur une portion limitée du spectre, on ne peut les comparer avec des mesures effectuées sur l'ensemble du spectre impliqué dans le rayonnement. Au delà de $20\,\mu$m, il reste 24% du rayonnement. Dans [29] une étude permet d'évaluer l'erreur produite dans ce cas.

d. Conclusion

Une comparaison de cinq méthodes de mesure a été effectuée, couvrant toute la gamme d'émissivité possible et des propriétés spéculaires différente. Il en ressort que la méthode

réflectométrique utilisée par EM1 n'est pas adaptée aux matériaux spéculaires. EM1 a été développé pour effectuer des mesures principalement sur des bétons bitumineux très diffusants. EM2 donne des résultats en accord avec les méthodes développées au LNE pour le PVC et la peinture aluminium. Les mesures calorimétriques effectuées au LNE sur le PVC souffrent d'une incertitude très grande due au gradient de température dans l'épaisseur du matériau qui empêche de mesurer avec précision la température de surface de celui-ci. Pour effectuer une étude comparative on doit exclure l'aluminium sablé qui présente une grande dispersion des propriétés de surface. Une bonne alternative pour ce domaine d'émissivité (autour de 0.5) est la peinture aluminium utilisée ici.

4.3 Mesure effectuées *in-situ* sur un bâtiment

Dans le cadre d'un projet financé par l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie), une campagne de mesures a été effectuée en vue de réaliser un bilan thermique quantitatif des pertes sur un bâtiment public de la ville de Noisiel (77). Ce diagnostic utilise des caméras thermiques. Dans ce cadre, une connaissance précise des valeurs de l'émissivité était nécessaire dans la bande spectrale des caméras ainsi qu'en bande large. Les valeurs de la littérature ne sont pas suffisamment précises pour cette étude. Les mesures ont été entreprises sur site avec le nouveau dispositif. Les mesures ont été réalisées en février 2012 sur les différentes parois (murs intérieurs et extérieurs) ainsi que sur les surfaces participant à l'environnement radiatif extérieur. Le tableau 4.3 montre les valeurs de l'émissivité de ces surfaces. On peut y voir les émissivités en large bande et en bande III, ainsi que les incertitudes de chacune des mesures. La figure 4.16 montre l'appareil dans différentes situation de mesure.

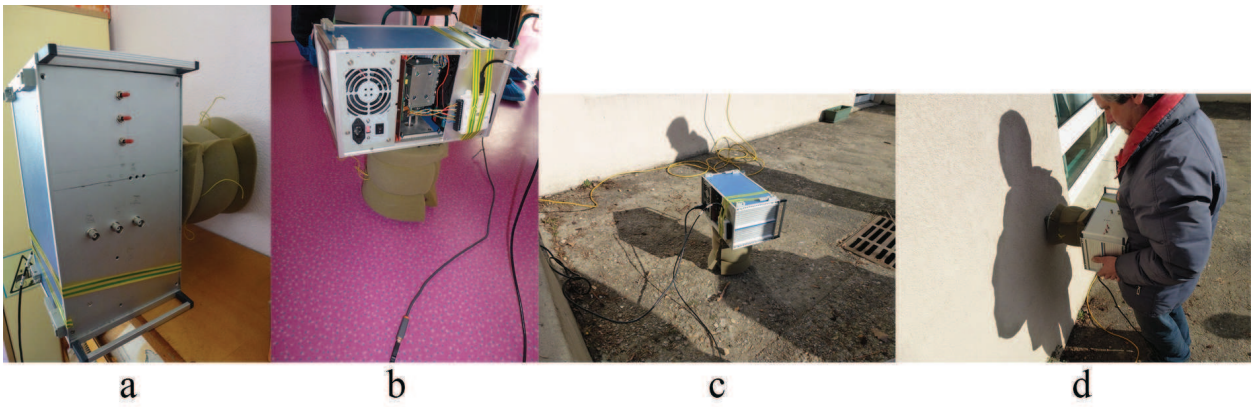


FIGURE 4.16 – Photos du dispositif de mesure *in-situ* : (a) contre un mur intérieur, (b) sur un sol intérieur, (c) sur un sol extérieur, (d) contre un mur extérieur

4.4 Mesures effectuées *in-situ* sur des échantillons de route dans le cadre de l'opération de recherche PALM

L'objectif de cette étude est de développer un outil de prévention du risque hivernal. Pour cela, un véhicule a été instrumenté pour établir la susceptibilité au verglas des itinéraires routiers. Ce travail a été effectué en collaboration avec le CETE (Centre d'Etude Technique de l'Equipement) de l'est à Nancy. Ce véhicule est appelé par la suite THERMOROUTE. La mesure s'effectue grâce à une caméra thermique embarquée sur ce véhicule. La caméra est une caméra infrarouge FLIR S65, le détecteur est une matrice non refroidie de microbolomètres

		Large bande		Bande III	
	Matériau	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

TABLE 4.3 – Exemples de mesures sur des surfaces de bâtiments

de 320 de résolution. La bande spectrale est : 7.5 μm - 13 μm. La sensibilité de cette caméra est de 0.08 K pour une précision de $\pm 2\%$. Le champ angulaire couvert est de $24° \times 18°$. La résolution angulaire est de 1.3 mrad. On compare les mesures de températures effectuées par la caméra à celles effectuées par un radiomètre de modèle PRT5 (BARNES® Pyrometer). Il s'agit d'un bolomètre effectuant la mesure dans la bande 9.5 μm - 11.5 μm. Sa sensibilité est de 0.1 K et sa précision de 0.5 K. Ces deux dispositifs de mesure sont présentés figure 4.17.

L'itinéraire étudié dans un premier temps fait 30 km de long et comporte des tronçons de routes départementales, nationales et autoroutes. On effectue en outre l'acquisition des paramètres atmosphériques (température d'air, taux d'humidité, pression atmosphérique) tous les 3 m. Une image thermique est effectuée tous les 12 m. La vitesse maximale du véhicule est de 70 $km.h^{-1}$.

La figure 4.18 montre les différents capteurs embarqués sur le véhicule. Un capteur de distance appelé trigger permet de synchroniser l'acquisition des mesures et de calculer la distance parcourue. La figure 4.19 montre la géométrie du dispositif.

On introduit dans le champ de la caméra un miroir diffusant permettant de déterminer la température d'environnement radiatif. On introduit aussi un carré peint avec de la peinture Nextel® pour avoir une référence de luminance. Ces deux éléments sont visibles sur les photos de la figure 4.20. Grâce à la connaissance des paramètres environnementaux, on a pu corriger les mesures de températures effectuées avec la caméra. La figure 4.21 montre les mesures non corrigées et la figure 4.22 les mesures une fois corrigées. Dans le cadre de ces travaux, il nous a été demandé d'effectuer les mesures d'émissivité sur des échantillons de route provenant de toute la France et stockés au CETE de Clermont-Ferrand. Ces échantillons sont conservés au frais et dans l'obscurité pour qu'ils conservent leur propriétés initiales. Les mesures ont été effectuées sur près de 180 échantillons. quelques mesures les plus significatives sont exposées dans le tableau 4.4.

Grâce à la connaissance de l'émissivité on peut affiner la corection de température. Il faut noter cependant que l'angle rasant avec lequel la route est vu par la caméra est un problème majeur. En effet, c'est dans ce domaine angulaire que l'émissivité directionnelle est la plus

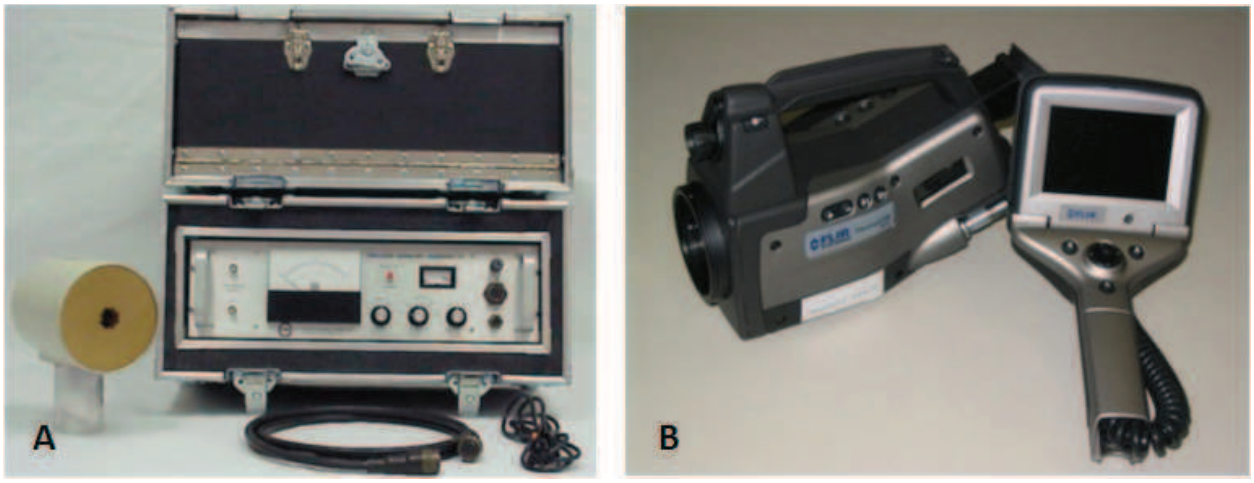


FIGURE 4.17 – Radiomètre PTR5 (photo A) et caméra thermographique FLIR S65 (photo B) utilisés pour le véhicule THERMOROUTE

Echantillon	ϵ Large bande	Incertitude	ϵ 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

TABLE 4.4 – Mesures d'émissivité d'échantillons de route en bande large et bande-III

variable.

Dans le projet PALM, une part du travail de recherhe est de proposer un modèle thermique de prédiction de la température de surface de la chaussée. Pour cela la connaissance de la température effective de la route est essentielle. Les mesures de températures de chaussée effectuées sans correction de l'environnemet radiatif et de la valeur de l'émissivité peuvent être différentes de la température réelle de celle-ci. Les graphiques 4.21 et 4.22 montre les écarts de températures mesurés dans les deux cas. L'émissivité intervient aussi dans le modèle thermique visant à prédire la température de surface à partir des données météorologiques.

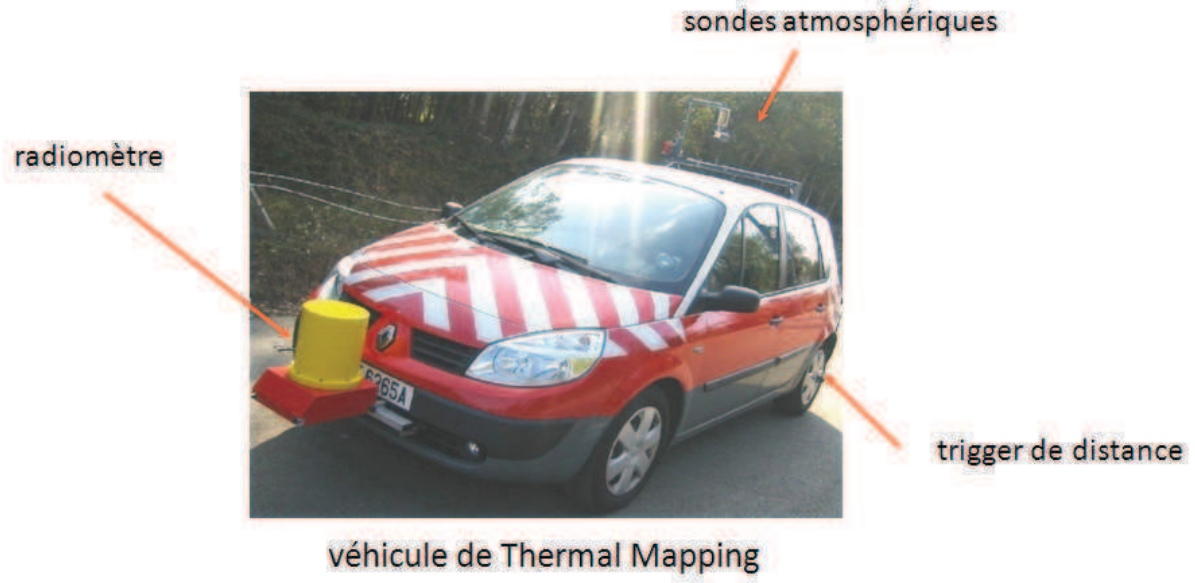


FIGURE 4.18 – Véhicule THERMOROUTE

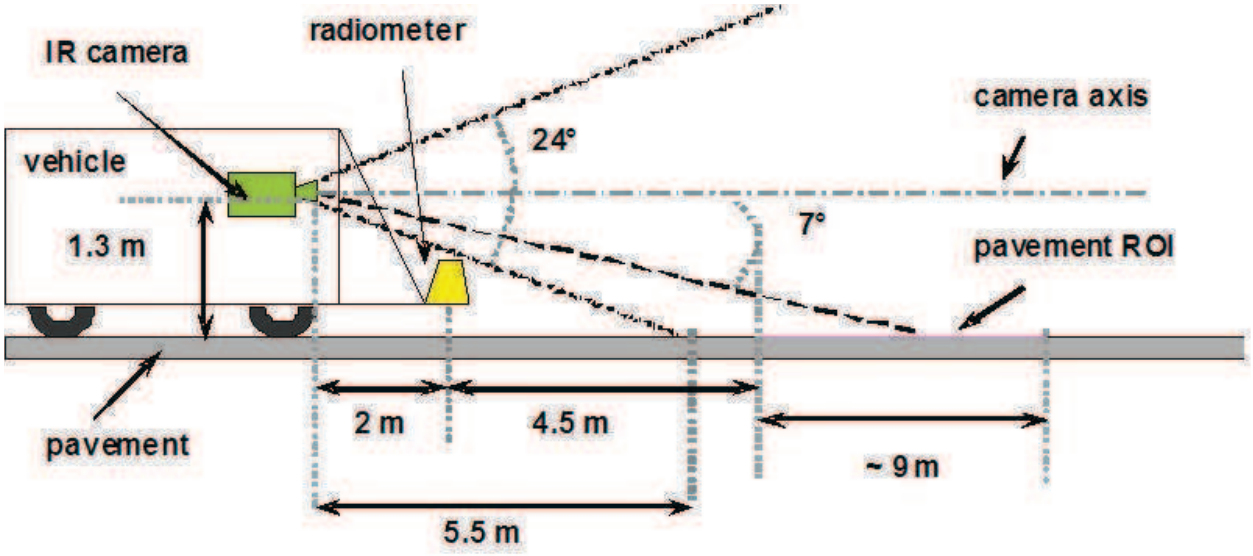


FIGURE 4.19 – Schéma du véhicule THERMOROUTE : présentation des décalages spatiaux entre les différentes mesures de températures

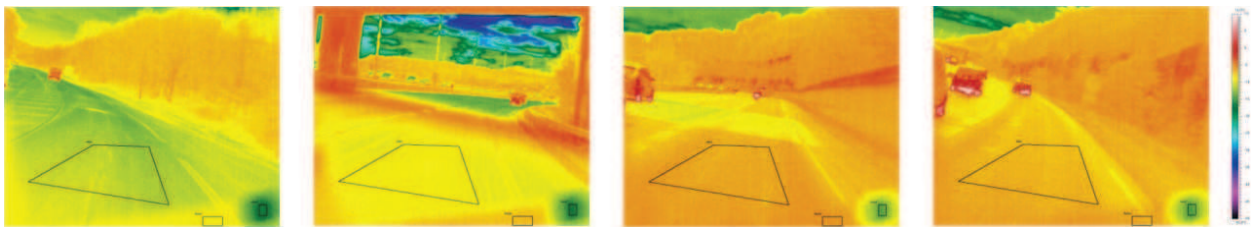


FIGURE 4.20 – Thermogrammes effectués avec le véhicule THERMOROUTE - miroir diffusant (élément froid en bas à droite) - carré de peinture Nextel® (à gauche du miroir diffusant)

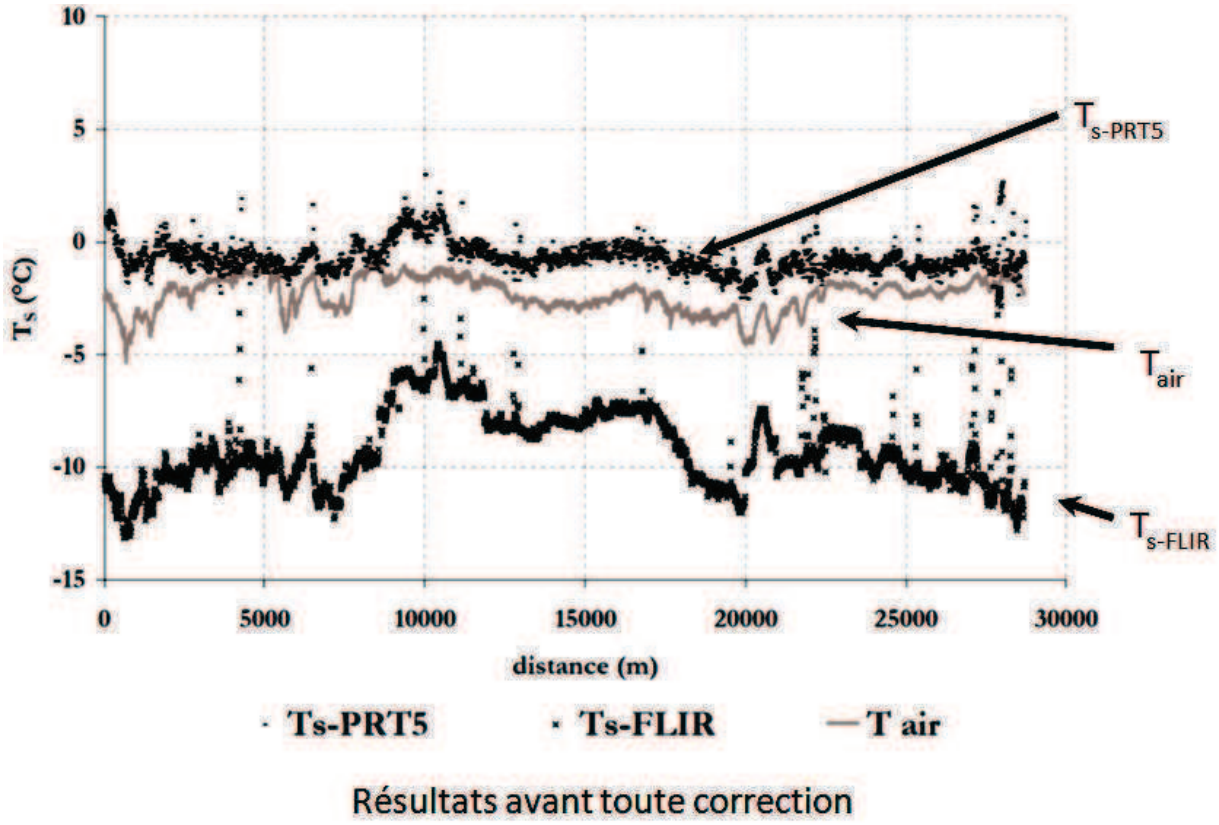


FIGURE 4.21 – Résultats des mesures de température avant toute correction. Ts-PTR5 : température de surface de la route mesurée avec le radiomètre, Ts-FLIR : température de surface de la route mesurée avec la caméra thermique FLIR, Tair : température de l'air

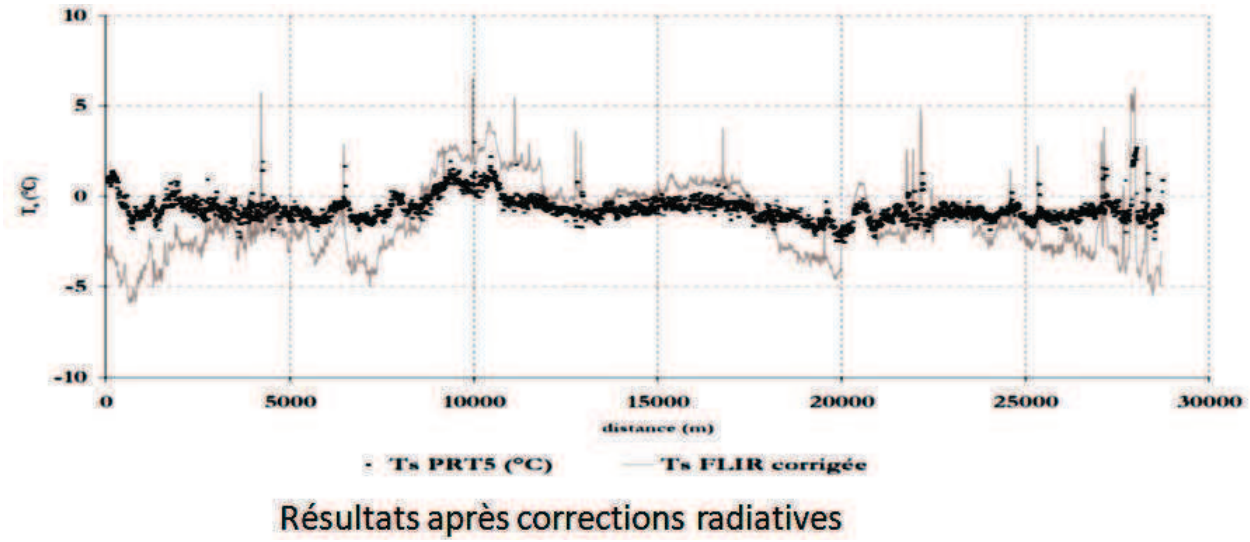


FIGURE 4.22 – Résultats des mesures de température après correction. Ts-PTR5 : température de surface de la route mesurée avec le radiomètre, Ts-FLIR corrigée : température corrigé de surface de la route mesurée avec la caméra thermique FLIR

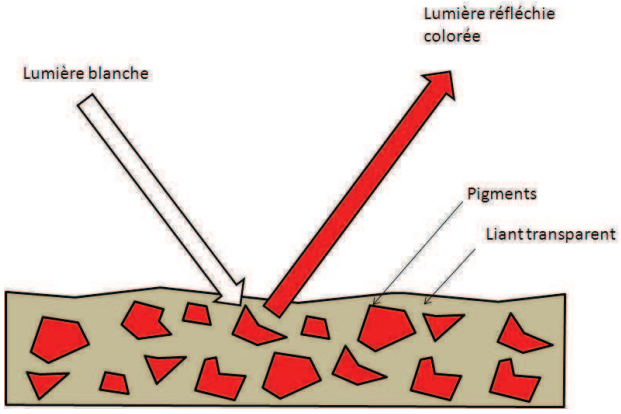


FIGURE 4.23 – Principe des peintures composée d'un pigment minéral dispersé dans un liant

4.5 Mesures effectuées sur des échantillons de fresques et de peintures d'art

Cette étude à été effectuée en collaboration avec J.L.Bodnard et K.Mouhoudi du Groupe de Recherche en Sciences Pour l'Ingénieur (GRESPI, Equipe de Caractérisation THermique multi échelle (ECATHERM). Elle porte sur des échantillons de peintures d'art en vue d'une étude systématique. Une peinture est le résultat d'un mélange entre un liant et un pigment. Le liant assure la cohésion de l'enduit, alors que le pigment assure la coloration. Plusieurs liants sont utilisés depuis des siècles, l'un des plus anciens est le jaune d'oeuf. Au XVème siècle Van-Eyck a modernisé la technique en effectuant une émulsion d'huile sicative et d'un composé aqueux . La colle d'os est aussi utilisée en solution aqueuse. Une autre technique ne s'apparentant pas à ce groupe liant/pigment est la technique de la fresque. Celle-ci connue depuis l'antiquité consiste à peindre avec une solution aqueuse contenant le pigment sous forme de poudre dispersée directement sur le mur enduit de plâtre frais (d'où son nom issu de l'italien fresca). Le pigment est absorbé par le plâtre et se fixe grâce à celui-ci. Les pigments utilisés ici sont des pigments minéraux solides sous forme de poudres dispersées dans le liant. Le liant se doit d'être transparent dans le domaine visible pour ne pas masquer les pigments (figure 4.23)

L'étude a porté sur près de 60 échantillons. Cela nous a apporté une information essen-

tielle concernant ce type de peinture. Cette étude ne peut à l'heure actuelle être extrapolée aux peintures utilisant des pigments organiques solubles dans le liant, ce qui peut être le cas de certaines peintures modernes. En effet, les peintures d'art traditionnelles utilisent quasi-exclusivement des pigments minéraux.

Le tableau 4.5 montre l'ensemble des mesures. Pour alléger celui-ci, on n'a pas fait apparaître les incertitudes.

Le travail sur ces mesures a consisté à trouver une corrélation entre les mesures par liant et par pigment. La moyenne et l'écart-type des mesures d'émissivité ont été calculés par familles. Le tableau 4.6 montre ce calcul pour des échantillons ayant pour liant la colle d'os. L'écart-type calculé sur l'émissivité en large bande vaut 0.048 et 0.08 pour la bande III. Le signal étant plus faible dans la bande III car possédant moins d'énergie explique que l'écart-type est plus grand pour les mesures d'émissivité dans cette bande. On constate que l'écart-type est plusieurs fois supérieur à l'incertitude qui est de l'ordre de 0.015. Cela prouve que ce n'est pas le liant qui impose l'émissivité. Si l'on effectue cette même démarche en classant les mesures par pigment plutôt que par liant, on obtient le tableau 4.7. On constate dans ce cas que la corrélation est forte, et que l'écart-type pour ces mesures est inférieur à l'incertitude de mesure. On constate en outre une réelle différence d'émissivité entre les mesures en large bande et en bande III. Cela permet de conclure que si le liant est transparent dans le visible (il ne masque pas la couleur du pigment) il l'est également dans le domaine de l'infrarouge. Une étude plus poussée utilisant des mesures spectrales pourrait permettre de déterminer l'influence du liant en mesurant des bandes d'absorption spécifiques.

Liant	Pigment	Emissivité bande large	Emissivité bande III
Colle	Massicot	0.798	0.804
Caséine	Cinabre	0.815	0.718
Colle	Cinabre	0.845	0.733
Fresque	Ocre	0.868	0.765
Fresque	Cinabre	0.872	0.799
Colle	Ocre	0.873	0.764
Colle	Ocre	0.874	0.762
Huile	Cinabre	0.874	0.800
Fresque	Ocre	0.875	0.773
Huile	Ocre	0.881	0.766
Fresque	Lapis	0.885	0.806
Caséine	Ocre	0.889	0.794
Jaune d'oeuf	Cinabre	0.893	0.793
Fresque	Lapis	0.896	0.833
Colle	Lapis	0.905	0.827
Fresque	Bleu de Prusse	0.908	0.892
Colle	Blanc de titane	0.914	0.955
Fresque	Noir de charbon	0.915	0.841
Colle	Jaune d'étain	0.915	0.912
Fresque	Blanc de titane	0.918	0.965
Fresque	Indigo	0.921	0.860
Jaune d'oeuf	Azurite	0.924	0.901
Fresque	Jaune d'étain	0.925	0.903
Colle	Noir de charbon	0.926	0.847
Fresque	Noir de charbon	0.929	0.877
Caséine	Azurite	0.930	0.911
Fresque	Azurite	0.935	0.911
Colle	Blanc de plomb	0.937	0.948
Colle	Indigo	0.943	0.945
Colle	Azurite	0.946	0.926
Fresque	Blanc de plomb	0.947	0.944
Colle	Noir de charbon	0.950	0.886
Huile	Azurite	0.951	0.888
Colle	Bleu de Prusse	0.962	0.941

TABLE 4.5 – Mesures d'émissivité en large bande et en bande III de différents échantillons de peintures d'art

Pigment	Emissivité bande large	Emissivité bande III
Massicot	0.798	0.804
Cinabre	0.845	0.733
Ocre 1	0.873	0.764
Ocre 2	0.874	0.762
Lapis	0.905	0.827
Blanc de titane	0.914	0.955
Jaune d'étain	0.915	0.912
Noir de charbon 1	0.926	0.847
Blanc de plomb	0.937	0.948
Indigo	0.943	0.945
Azurite	0.946	0.926
Noir de charbon 2	0.950	0.886
Bleu de Prusse	0.962	0.941
Moyenne	0.907	0.865
Ecart-type	0.048	0.080

TABLE 4.6 – Mesures d'émissivité en large bande et en bande III de différents échantillons de peintures d'art avec liant colle

Liant	Pigment	Emissivité bande large	Emissivité bande III
Fresque	Ocre rouge	0.868	0.765
Colle	Ocre jaune	0.873	0.764
Colle	Ocre rouge	0.874	0.762
Fresque	Ocre jaune	0.875	0.773
Huile	Ocre jaune	0.881	0.766
Caséine	Ocre jaune	0.889	0.794
	Moyenne	0.877	0.771
	Ecart-type	0.007	0.012
Jaune d'oeuf	Azurite	0.924	0.901
Caséine	Azurite	0.930	0.911
Fresque	Azurite	0.935	0.911
Colle	Azurite	0.946	0.926
Huile	Azurite	0.951	0.888
	Moyenne	0.937	0.907
	Ecart-type	0.011	0.014
Fresque 1	Lapis	0.885	0.806
Fresque 2	Lapis	0.896	0.833
Colle	Lapis	0.905	0.827
	Moyenne	0.896	0.822
	Ecart-type	0.010	0.014

TABLE 4.7 – Mesures d'émissivité en large bande et en bande III de différents échantillons de peintures d'art classées par type de pigment

Conclusion générale

Dans le premier chapitre nous avons pu voir l'importance de l'émissivité dans le domaine des échanges thermiques. L'émissivité est le rapport entre le rayonnement de la surface étudiée et le rayonnement d'un corps noir idéal porté à la même température que cette surface et dans les mêmes conditions de mesure.

Le terme d'émissivité recouvre plusieurs définitions. On parle d'émissivité spectrale si l'on se réfère à une seule longueur d'onde. On parle d'émissivité totale si l'on intègre cette émissivité spectrale sur l'ensemble du spectre électromagnétique. Si l'on compare le rayonnement de la surface à celui du corps noir à la même température dans une direction unique on parle d'émissivité directionnelle. si l'on compare le rayonnement de la surface à celui du corps noir à la même température en prenant en compte l'ensemble des directions on parlera d'émissivité hémisphérique. On ne peut définir l'émissivité qu'à une température donnée. En effet, l'émissivité spectrale peut varier en fonction de la longueur d'onde et de ce fait l'émissivité totale dépend de la température. L'émissivité intervient dans la mesure de température de surface par mesure de luminance de cette surface. Cette méthode de pyrométrie optique se retrouve dans les méthodes utilisant une caméra infrarouge. Dans le domaine des mesures de température par thermographie infrarouge, nous avons évalué l'impact de l'incertitude sur l'émissivité sur l'incertitude sur la mesure de température. On constate qu'une erreur de 1% sur l'émissivité on a erreur de 0.75 K sur la température mesurée. C'est pour cela qu'il est impératif de mesurer précisément l'émissivité.

Le second chapitre est une étude bibliographique des diverses méthodes de mesure de l'émissivité. La méthode calorimétrique qui consiste à effectuer un bilan de la puissance

rayonnée par une surface connue du matériau étudié est la méthode la plus proche de la définition de l'émissivité totale hémisphérique. En effet cette méthode prend en compte tout le rayonnement électromagnétique pour l'ensemble des directions. Cependant tous les dispositifs expérimentaux utilisant cette méthode sont des dispositifs de laboratoire et ne peuvent être utilisé sur le terrain. La taille et la forme des échantillons pouvant être mesuré est généralement fixe. Cette méthode est donc une méthode de laboratoire utilisable sur un nombre réduit d'échantillon. D'autres méthodes plus souples à utiliser ont été développées. Les méthodes dites radiométriques consiste à mesurer le rayonnement émis par la surface étudiée avec un détecteur. Celui-ci peut mesurer une large bande spectrale comme les thermopiles ou les bolomètres, ou être spectralement sélectif pour étudier le rayonnement dans une gamme specrale spécifique. Pour obtenir l'émissivité on compare la puissance rayonnée par la surface étudiée à la puissance rayonnée par un corps noir. Ces méthodes sont bien adaptées pour mesurer l'émissivité directionnelle. Ces méthodes restent encore des méthodes de laboratoire et ne peuvent être utilisées sur le terrain pour des mesures d'émissivité à température ambiante.

La dernière catégorie de méthodes de mesure que nous avons étudiée concerne les méthodes indirectes. Celles-ci sont basées sur les loi de Kirchhoff mettant en relation l'émissivité et la réflectivité pour des matériaux opaques. Ces méthodes permettent de calculer l'émissivité à partir du coefficient de réflexion hémisphérique directionnel. On mesure ce dernier de plusieurs manières. L'une d'elle consiste à éclairer la surface étudié avec un flux lumineux correspondant au corps noir à la température à laquelle on souhaite connaître l'émissivité et a moduler en amplitude ce flux. Ainsi on peut mesurer le flux réfléchi lui même modulé en amplitude. C'est cette méthode qui est utilisée depuis plusieurs années au CERTES. On a démontré par ailleurs que les dispositifs expérimentaux et commerciaux ne sont pas exempts de défauts. Ceux qui utilisent une modulation de température de la source modifie notablement la répartition spectrale du rayonnement du corps noir. Ce défaut n'avait pas jusqu'à présent été mis en évidence.

L'appareil EM1 qui a été développé précédement ne permettait pas de mesures rapides,

c'est pour cela qu'un autre appareil utilisant une modulation grâce à un écran mobile a été développé. Le troisième chapitre décrit en détail ce nouvel appareil.

Celui-ci a été développé pour répondre à plusieurs exigences : d'une part permettre des mesures rapides, sur des échantillons hétérogènes de grandes dimensions, d'autre part, être capable d'effectuer les mesures d'émissivité directionnelle dans plusieurs bandes spectrales, l'objectif étant d'avoir un outil capable de nous aider à remplir une base de données d'émissivité totale et dans les bandes spectrales des caméras thermographiques. L'appareil développé a évolué au cours du temps. En effet, la difficulté de mesurer des échantillons spéculaires nous a obligé à mesurer séparément la réflexion spéculaire et la réflexion diffuse.

Le constat a été fait que si l'on veut moduler le flux infrarouge plus rapidement, on ne peut moduler la température de la source. L'inertie thermique empêche d'aller au-delà de quelques fractions de Hz. Il a donc été choisi d'utiliser un écran mobile. La plupart des écrans sont utilisés pour moduler un rayonnement dans une seule direction. Cela n'est pas suffisant si l'on souhaite mesurer le coefficient de réflexion hémisphérique directionnel. On a donc choisi un écran mobile en forme de cylindre. Ce dispositif permet de mesurer la réflexion en fonction de l'incidence en modulant à des fréquences différentes le rayonnement provenant de positions angulaires différentes. C'est cette innovation qui a été brevetée et qui permet maintenant de mesurer la réflexion spéculaire et la réflexion diffuse. Plusieurs améliorations ont été apportées pour permettre de mesurer rapidement une grande quantité d'échantillons. Cependant les biais que connaissent les autres émissomètres n'ont pas été supprimés sur ce nouvel appareil. Une correction de mesure est nécessaire si l'on souhaite utiliser cette mesure à température ambiante. Il est nécessaire de connaître la réponse spectrale autour de $10\,\mu$m. En effet, les variations de l'émissivité en fonction de la température dépendent de cette réponse spectrale. De plus, suivant la nature du matériau, si l'on souhaite connaître l'émissivité hémisphérique, il sera nécessaire de connaitre l'indicatrice d'émissivité. C'est en effet en fonction de la forme de cette indicatrice une fois intégrée que l'on déduit le coefficient permettant de passer de l'émissivité directionnelle normale (ou proche de la normale) à l'émissivité hémisphérique. Ces deux corrections peuvent être connues pour une famille en-

tière de matériaux, les mesures effectuées avec l'émissomètre portable étant corrigées ensuite grâce à ces données.

Les premières mesures effectuées avec cet appareil ont permis d'évaluer l'incertitude de mesure grâce à une étude mené en collaboration avec le LNE. Les mesures effectuées sur site ainsi que celles effectuées au CETE de Clermont-Ferrand ont permis de vérifier l'ergonomie de l'appareil et du logiciel d'archivage des mesures. Cela a démontré que l'on pouvait sans difficulté mesurer l'émissivité sur une centaine d'échantillon en une journée.

L'étude de l'émissivité des matériaux n'est qu'une étape permettant d'aboutir à des mesures quantitatives plus précises. Cette étude doit être étendue à tous les paramètres influançant la mesure de température par thermographie infrarouge.

L'apport de cette étude a été utile pour obtenir un nouvel outil de mesure au CERTES, mais cela a permis également de mieux comprendre les propriétés radiatives des surfaces et leurs mesures. On a mis en évidence notamment la modification de la répartition spectrale d'une source modulée. Cette étude a aussi été l'occasion d'effectuer un état des lieux des méthodes de mesure de l'émissivité et des appareils commerciaux existant sur le marché. L'apport scientifique de cette étude à permis d'affiner les mesures de température par méthode radiométrique. Sur le projet THERMOROUTE la question de la température des sols est cruciale autour de 0 °C pour déterminer la succeptibilité au gel et l'opportunité de procéder à un salage d'un itinéraire. Des erreurs de plusieurs degrés sur la température de chaussée ne sont pas acceptables.

Bibliographie

Bibliographie générale et thermographie

[1] J.F. Sacadura et al., *Initiation aux transferts thermiques*, édition Tec et Doc (1993)

[2] X.P. Maldague, *Theory and practice of infrared technology for non destructive testing*, Ed. Wiley (2001)

[3] S. Datcu, L. Ibos, Y. Candau, S. Matteï, *Improvement of building wall surface temperature measurements by infrared thermography*, Infrared Phys. Technol., 451 (2005)

[4] P. Hervé, *Mesure de l'émissivité thermique*, Technique de l'Ingénieur, r2737 (2005)

[5] D. Pajani, *Thermographie - Principes et mesure*, Technique de l'Ingénieur, r2740 (2013)

[6] D. Pajani, *Mesures par thermographie*, ADD Edition (1989)

[7] M. Larbi youcef, V. Feuillet, L. Ibos, P. Balcon, Y. Candau, A. Filloux, *Quantitative diagnosis of insulated building walls of restored old constructions using active infrared thermography*, QIRT Journal, Vol. 8,(1), pp.65-87, 2011., ADD Edition (1989)

[8] P. Lorrain, D.R. Corson, *Champs et ondes électromagnétiques*, Armand Collin, 720 pages (1979)

[9] Fleury et Mathieu, *Lumière*, Eyrolles (1965)

[10] BIPM, *Evaluation of measurement data - guide to the expression of uncertainty in measurement, JCGM 100 :2008, © JCGM 2008*, BIPM, First edition (2008)

Mesure d'émissivité : généralités

[11] L. Kauder, *Spacecraft Thermal Control Coatings References*, NASA-TP-2005-212792, NASA-Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, (2005)

[12] J.F. Sacadura, *Measurement techniques for thermal radiation properties*, Proceedings of The Ninth International Heat Transfer Conference, Jerusalem, Israel P 207-222 (1990)

[13] NASA, *Measurement of thermal radiation properties of solids*, Symposium held at Dayton, Ohio, september 1962, 600 pages (1963)

Mesure d'émissivité : dispositifs expérimentaux

Méthode calorimétriques

[14] J. Hameury, B. Hay, J. R. Filtz, *Measurement of Total Hemispherical Emissivity Using a Calorimetric Technique*, Int. J. Thermophys, 1607 (2007)

[15] C. Fabron, A. Meurat, *Measurement of total hemispheric emissivity at low temperature, International Symposium on Environnemental Testing for Space Program*, Liège, Belgium (2001)

[16] S. Moghaddam, J. Lawler, J. Currano, *Novel method for measurement of total hemispherical emissivity*, J. Thermophys. Heat Transfer ,1, (2007)

Méthode radiométriques

[17] 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 , 245-248 Vol. 56-3 (2009)

[18] A. Mazikowski, K .Chrzanowski, *Non-contact multiband method for emissivity measurement*, Infrared Phys. Technol., 91 (2003)

[19] 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)

[20] D. Especel, S. Matteï, *Total Emissivity Measurement Without Use of an Absolute Reference*, Infrared Phys. Technol., 777-784 vol.37 (1996)

[21] A. Pantinakis, N. Kortsalioudakis, *A Simple High-Sensitivity Radiometer in the Infrared for Measurements of the Directional Total Emissivity of Opaque Materials at Near-Ambient Temperatures*, International Journal of Thermophysics, 1843-1854 Vol. 22-6 (2001)

[22] H. Tanaka, S. Sawai, K. Morimoto, K. Hisano, *Evaluation of hemispherical total emissivity for thermal radiation calorimetry*, Int. J. Thermophys, 927 (2000)

[23] L. Hanssen, S. Mekhontsev, V. Khromchenko, *Infrared Spectral Emissivity Characterization Facility at NIST*, Thermosense XXVI, edited by Douglas D. Burleigh, K. Elliott Cramer,G. Raymond Peacock, Proc. of SPIE Vol. 5405, SPIE, Bellingham,WA (2004)

Méthode réflectométriques

[24] J-P. Monchau, M. Marchetti, L. Ibos, J. Dumoulin, V. Feuillet, Y. Candau, *Infrared Emissivity Measurements of Building and Civil Engineering Materials : A New Device for Measuring Emissivity*, Int. J. Thermophys., in press (2013)

[25] L. Ibos, M. Marchetti, A. Boudenne, S. Datcu, J.Livet, Y. Candau, *Infrared emissivity measurement device : Principle and applications*, Meas. Sc. Tech., 2950 (2006)

[26] J. Hameury, B. Hay, J.R. Filtz, *Measurement of Infrared Spectral Directional Hemispherical Reflectance and Emissivity at BNM-LNE*, International Journal of Thermophysics, Vol. 26-6, (2005)

[27] L.M. Hanssen, S. Kaplan, *Infrared diffuse reflectance instrumentation and standards at NIST*, Anal. Chim. Acta, 289 (1999)

Autres références sur les mesures d'émissivité

[28] P. van Nijnatten, M.G. Hutchins, N.B. Kilbey, A. Roos, K. Gelin, F. Geotti-Bianchini, P. Polato , C. Anderson, F. Olive, M. Köhl, R. Spragg, P. Turner *Uncertainties in the determination of thermal emissivity by measurement of reflectance using Fourier transform spectrometers*, Thin Solid Films 164-169 Vol. 502 (2006)

[29] K. Gelin, A. Roos, F. Geotti-Bianchini, P. van Nijnatten, *Thermal emissivity of coated glazing, simulation versus measurements*, Optical Materials, 705-712 Vol. 27 (2005)

[30] J.F. Sacadura, *Influence de la rugosité sur le rayonnement thermique emis par les surfaces opaque : essai de modèle*, Int. J. Heat Mass Transfer, 1451-1465 Vol. 15 (1972)

[31] L. del Campo, R.B. Pérez-Sáez, L. González-Fernández, X. Esquisabel, I. Fernández, P. González-Martín, M.J. Tello, *Emissivity measurements on aeronautical alloys*, Journal of Alloys and Compounds 482-487 Vol. 489 (2010)

[32] P. Hervé, J. Cedelle, I. Negreanu, *Infrared technique for simultaneous determination of temperature and emissivity*, Infrared Phys. Technol. (2010)

[33] K. Chrzanowski, *Problem of determination of effective emissivity of some materials in MIR range*, Infrared phys. Technol. , 679-684,Vol. 36-3 (1995)

[34] T.G. Kollie,F.J. Weaver,D.L. McElroy, *Evaluation of a Commercial, Portable, Ambient-Temperature Emissometer*, Rev. Sci. Instrum, 1509-1517,Vol. 61 (1990)

[35] K.E. Nelson, E.E.Leudke, J.T.Bevans, *A device for rapid measurement of total emittance*, Journal of Spacecraft and Rockets, 758-760 ,Vol.3, No. 5 (1966)

[36] Siroux M., Tang-Kwor E. et Matteï S. *A periodic technique for emissivity measurements of insulating materials at moderate temperature*, Meas. Sci. Technol., **9**, 1956-1962 (1998)

[37] J.P. Monchau, J. Hameury, P. Ausset, B. Hay, L. Ibos, Y. Candau, *Comparative Study of Radiometric and Calorimetric Methods at CERTES and LNE for Total Hemispherical Emissivity Measurements*, In Press (2014)

Mesure d'émissivité à haute température

[38] A. Otsuka, K. Hosono, R.Tanaka, K. Kitagawa, N. Arai, *A survey of hemispherical total emissivity of refractory metals in practical use*, Energy, (2004)

[39] O. Rozenbaum, D. De Sousa Meneses, Y. Auger, S. Chermanne, P. Echegut, *A spectroscopic method to measure the spectral emissivity of semi transparent material up to high temperature*, review of scientific instrument, 4020-4025 Vol. 70-10 (1999)

[40] G. Neuer, G. Jaroma-Weiland, *Spectral and total emissivity of high température materials*, Int. J. Thermophys, 917-929 Vol. 19-3 (1998)

[41] M. Kobayashi(s), M. Otsuki, H. Sakate, F. Sakuma, A. Ono, *System for measuring the spectral distribution of normal emissivity of metals with direct current heating*, Int. J. Thermophys, 289-298 Vol. 20-1 (1999)

[42] H. Watanabe, M. Susa, H. Fukuyama, K. Nagata, *Phase (liquid/solid) dependence of normal spectral emissivity for iron, cobalt, and nickel at melting points*, Int. J. Thermophys, 473-488 Vol. 24-2 (2003)

[43] R. Brandt, C. Bird, G. Neuer, *Emissivity reference paints for high temperature applications*, Measurement, 731-736 Vol. 41 (2008)

[44] C.P. Cagran, L.M. Hanssen, M. Noorma, A.V. Gura, S.N. Mekhontsev, *Temperature-Resolved Infrared Spectral Emissivity of SiC and Pt-10Rh for Temperatures up to* $900^{\circ}C$, Int. J. Thermophys, Vol. 28-2 (2007)

Mesure d'émissivité sur des semiconducteurs

[45] S. Abedrabbo, J.C. Hensel, A.T. Fiory, B. Sopori, W. Chen, N.M. Ravindra, *Perspectives on emissivity measurements and modeling in silicon*, Materials science in semiconductor processing, 187-193 (1998)

[46] N.M. Ravindra, B. Sopori, O.H. Gokce, S.X. Cheng, A. Shenoy, L. Jin, S. Abedrabbo, W. Chen, Y. Zhang, *Emissivity measurement and modeling of silicon-related materials : An overview*, Int. J. Thermophys, 1593-1611 Vol. 22-5 (2001)

[47] T. Walach, *Emissivity measurements on electronic microcircuits*, Measurement, 503-515 Vol. 41 (2008)

Mesure d'émissivité sur les sols et la végétation pour l'observation satellitaire

[48] W. Snyder, Z. Wan, Y. Zhang, Y. Z. Feng, *Thermal Infrared* $(3-14\mu m)$ *Bidirectional Reflectance Measurements of Sands and Soils*, Remote sensing environment, 101-109 Vol. 60 (1997)

[49] C. Coll, V. Caselles, E. Valor, E. Rubio, *Validation of température-emissivity separation and split-window methods from TIMS data and ground measurements*, Remote sensing environment, 232-242, Vol. 85 (2003)

[50] Z.L. Li,F. Becker, M.P. Stoll, Z. Wan *Evaluation of different methods for extracting relative spectral emissivity information from simulated thermal infrared multispectral scanner data*, Remote sensing environment, 122-138, Vol. 69 (1999)

[51] A. C. Wilber, D.P. Kratz, S.K. Gupta, *Surface emissivity maps for use in satellite retrievals of longwave radiation*, NASA/TP-1999-209362 (1999)

[52] M. Hori, T. Aoki, T. Tanikawa, H. Motoyoshi, A. Hachikubo, K. Sugiura, T.J. Yasunari,

H. Eide, R. Storvold, Y. Nakajima, F. Takahashi, *In-situ measured spectral directional emissivity of snow and ice in the 8-14 μm atmospheric window*, Remote Sensing of Environment, 486-502 Vol. 100 (2006)

Brevet

[53] Yvon C., Monchau J-P., Pellissier R. et Caruana J-P. *Dispositif de mesure de température à balayage*, demande de dépôt de brevet effectuée en 1994, FR-9402290

[54] Ibos L., Monchau J-P. et Candau Y. *Dispositif de mesure de l'émissivité ou de la réflectivité d'un échantillon*, demande de dépôt de brevet effectuée en février 2012, FR-1251476

Thèses

[55] M.Siroux *Développement de techniques de mesure de l'émissivité de matériaux opaques à température ambiante. Approches radiométrique et calorimétrique en régime périodique*, Thèse Université Paris 12 (1996).

[56] Datcu S. *Quantification des déperditions thermiques des bâtiments par thermographie infrarouge*, Thèse Université Paris 12 (2002).