



## Méthodologie applicable à la mesure de l'émittance de matériaux électromagnétiques furtifs multifonctions IR/RAM

Marc Schiffmann, Philippe Ed. Gravisse, Brett Kraabel

### I INTRODUCTION

#### I 1 Bilan radiatif d'une surface chaude

Une surface chaude peut être décrite comme un générateur de rayonnement IR ,quand on applique un revêtement à sa surface ,on peut décrire les échanges radiatifs d'une manière simplifiée voir Fig.1

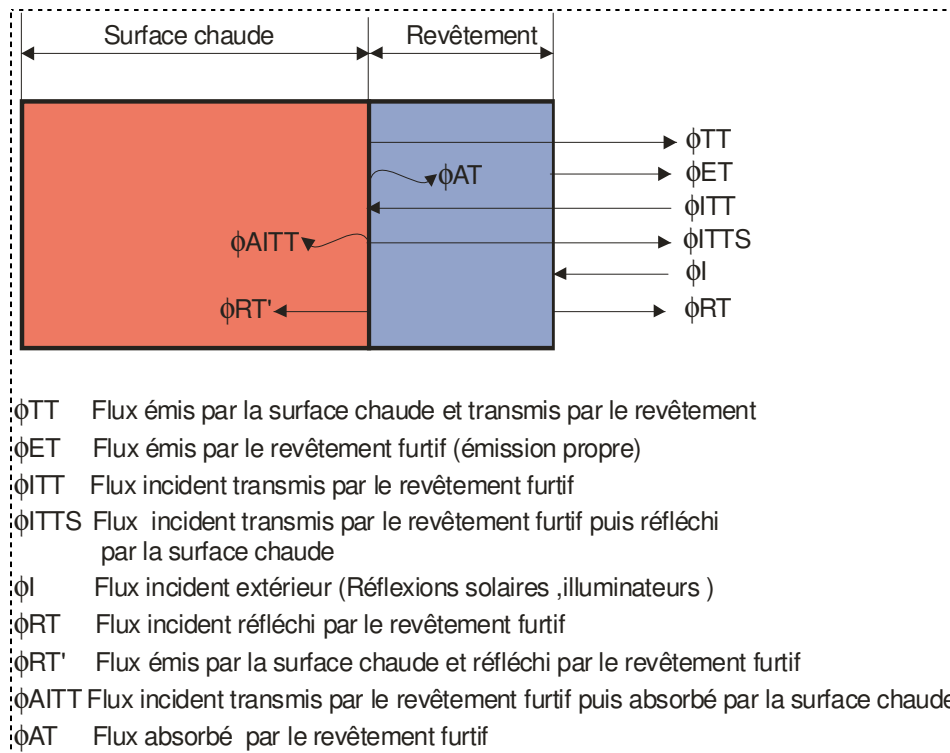


Fig.1 Modèle simplifié des échanges radiatifs au sein d'une surface

## I.2 Corps noir, corps gris

### I.2.1 Loi de Planck

L'émission d'un corps noir répond à la loi dite de "Planck" basée sur des considérations de thermodynamique statistique, cette relation a pour forme :

$$E_{\lambda} = (2\pi hc^2/\lambda^5) * (1/(hc/e^{kT}) - 1)$$

où :

K= constante de Boltzman ( $1.38042 * 10^{-23}$  W\*S /K)

C= Célérité ( $2.99793 * 10^8$  m/s)

$E_{\lambda}$  = Emittance spectrale W /cm<sup>2</sup> /μ

### I.2.2 Loi de WIEN

Cette loi permet de déterminer une loi de pic d'émission du corps noir en fonction de la température par dérivation de la loi de Planck et prend la forme de la relation ci-dessous :

$$\lambda_{\max} = 2898/T$$

où :

$\lambda$  =longueur d'onde en microns

T =Température en K

Le tableau ci-dessous nous donne les longueurs d'onde correspondantes aux pics d'émission des corps noirs ou gris

Température en K	Pics d'émission
200	14,40
240	12,00
260	11,07
280	10,28
300	9,60
320	9,00
340	8,47
360	8,00
380	7,57
400	7,20
420	6,85
440	6,54
460	6,26
480	6,00
500	5,76

Température en K	Pics d'émission
520	5,53
540	5,33
560	5,14
580	4,96
600	4,80
620	4,64
640	4,50
660	4,36
680	4,23
700	4,11
720	4,00
740	3,89
760	3,80
780	3,70
800	3,60

### I.2.3 Loi de STEPHAN BOLTZMANN

Cette loi est obtenue par intégration de la loi de PLANCK et permet de déterminer l'énergie totale rayonnée par le corps noir pour une température donnée. La relation suivante nous donne la relation de STEFAN-BOLTZMANN :

$$E = \epsilon \cdot \sigma T^4$$

où :

E = Energie rayonnée en W/cm<sup>2</sup>

$\epsilon$  = Emissivité (=1 dans le cas du corps noir)

$\sigma$  = Constante de STEPHAN-BOLTZMANN ( $5.673 \cdot 10^{-12}$  W/(cm<sup>2</sup>\*T<sup>4</sup>))

T = Température en K

### I.2.4 Loi de KIRCHHOFF

Energie incidente

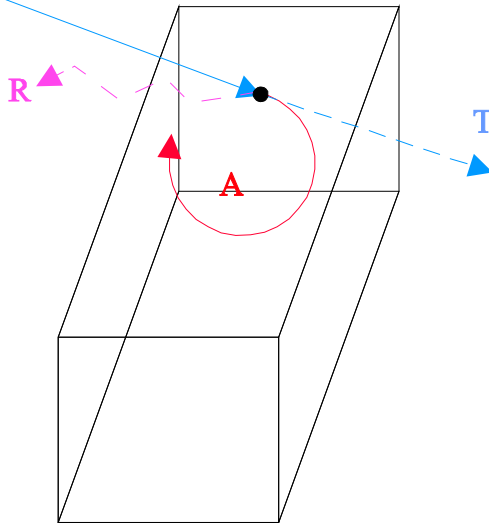


Fig.2 Loi de KIRCHHOFF

L'influence d'un matériau sur l'énergie rayonnée est déterminée par la loi de KIRCHHOFF dans certaines conditions. Quand un rayonnement monochromatique frappe la surface du matériau, une partie T de ce rayonnement est transmise par le corps, une partie A est absorbée par le corps et une partie R est réfléchié par le corps. (Fig.2).

Ces 3 coefficients : Absorption, Réflexion, Transmission, sont liés par la relation :

$$A_{\lambda} + T_{\lambda} + R_{\lambda} = 1$$

où :

$R_{\lambda}$  = Réflexion spectrale

$T_{\lambda}$  = Transmittance spectrale

$A_{\lambda}$  = Absorption spectrale

F

Or selon la théorie du corps noir ou gris toute énergie  $E_{\lambda}$  absorbée est réémise dans sa totalité et ce à la même longueur d'onde.

Cette relation est valable dans les conditions suivantes :

- Corps noir ou gris répondant à la loi de PLANCK ou de STEPHAN-BOLTZMANN
- Corps à l'équilibre thermique

**a) Cas du corps noir.**

Dans le cas extrême du corps noir nous avons une absorption totale de l'énergie incidente ce qui se traduit à une longueur d'onde donnée :

$$R(\lambda) = 0$$

$$T(\lambda) = 0$$

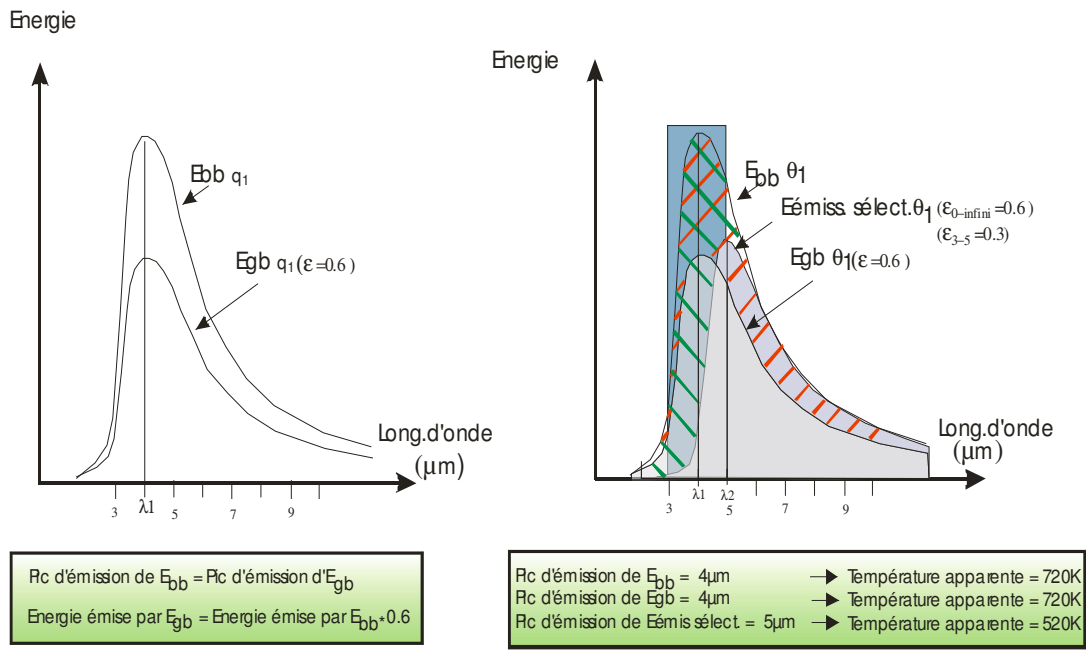
Ce qui entraîne une absorption totale du rayonnement incident et une émission totale de l'énergie absorbée. Ces conditions sont vérifiées pour toutes les longueurs d'ondes. C'est pour toutes ces raisons que le corps noir sert de référence pour les mesures d'émissivité des matériaux ainsi qu'en thermographie infrarouge.

**b) Cas du corps gris.**

Un corps gris se définit, en simplifiant, comme un corps dont le spectre d'émission se déduit directement de celui d'un corps noir à un coefficient près et ce pour toutes les longueurs d'ondes. On peut admettre que la loi de Planck s'applique moyennant quelques aménagements à ce type de corps. Le spectre d'émission d'un corps gris est donc homothétique à celui du corps noir.

**c) Corps à émissivité sélective.**

Il est évident qu'un corps qui par exemple absorbe un rayonnement ultra violet 365 nm et réémet l'énergie absorbée à une longueur supérieure (loi de Stoke) ne respecte pas les conditions d'applications de la loi de Kirchhoff, il en est de même pour les substances dites anti-stocke dont les longueurs d'ondes d'absorption sont supérieures aux longueurs d'ondes d'émission; en effet la relation  $A+R+T=1$  doit s'appliquer spectralement. Ces matériaux n'ont pas de spectre d'émissivité typique d'un corps gris et présentent des écarts par rapport à la loi de Planck. Les fig3 ci-dessous nous expliquent les écarts de comportement entre un corps gris, noir et un corps à émissivité sélective



Température réelle 720K

Principe de fonctionnement des matériaux à basse émittance

Principe de fonctionnement des matériaux à émissivité sélective

Fig.3 Principe de fonctionnement des matériaux à émittance sélective

## II PRINCIPES DE MESURES UTILISABLES ET LIMITATIONS DE CES PRINCIPES.

### II.1 Types de mesures utilisables.

Pour pouvoir qualifier un matériau en vue de son application dans le domaine de la discrétion infra-rouge (IR) il existe plusieurs moyens de mesures plus ou moins complexes ces principes de mesures sont :

- Mesure indirecte par mesure de T% et R% .
- Mesure directe par spectroradiométrie.
- Mesure directe large bande (3,7 $\mu$ -4,5 $\mu$  et 8  $\mu$ -12 $\mu$ )
- Mesure directe par caméra infra-rouge

### II .2 Mesure indirecte par mesure de transmittance et réflectance spectrales.

#### II.2.1 Principe

On mesure d'une part le coefficient de :

- Transmittance spectrale du matériau
- Réflectance spectrale du matériau

On en déduit alors l'absorbance spectrale (et donc l'  $\epsilon$ ) par application de la loi de Kirshhof , voir fig.4 .

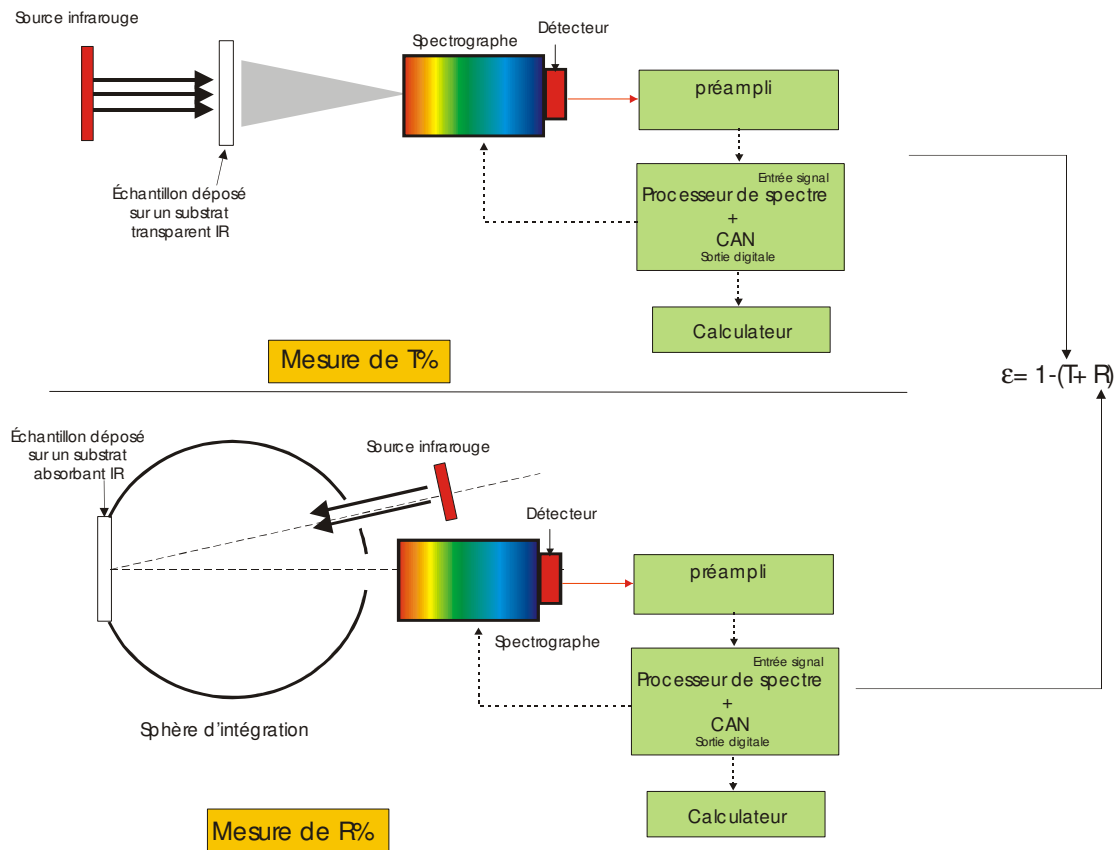


Fig.4 mesure indirecte de l'émissance spectrale d'un matériau

## II.2.2 Limites et avantages de ce principe de mesure

### Inconvénients

Ce principe de mesure est cohérent dans le cas de matériaux répondant à la loi de Planck, mais dans le cas des matériaux à « émissivité sélective » a-Planckiens, certaines longueurs d'ondes sont absorbées pour être réémises dans des longueurs d'ondes supérieures; Il n'y a plus concordance entre  $E_\lambda$  absorbé = énergie réémise à la même longueur d'onde (l'énergie est réémise à une autre longueur d'onde).

### Avantages

Ce principe de mesure par utilisation de la loi de KIRCHHOFF est bien connu et permet de mesurer l'émissivité des matériaux de type corps gris en utilisant du matériel de mesure disponible sur étagère.

## II.3 Mesure directe par mesure spectroradiométrique.

### II.3.1 Principe

Ce principe permet de réaliser les mesures radiatives propres au matériau par analyse spectrale directe du rayonnement à différentes températures. On se rapproche donc des conditions réelles d'utilisation du matériau puisque la mesure se fait aux températures de fonctionnement choisies. La fig.5 décrit le principe de mesure spectroradiométrique utilisant un puit thermique (principe de mesure CEA DAM et CREA) et la fig. 6 le même principe mais à température ambiante (principe de mesure LPRL)

#### a) Mesure d'émittance spectrale avec un puit thermique

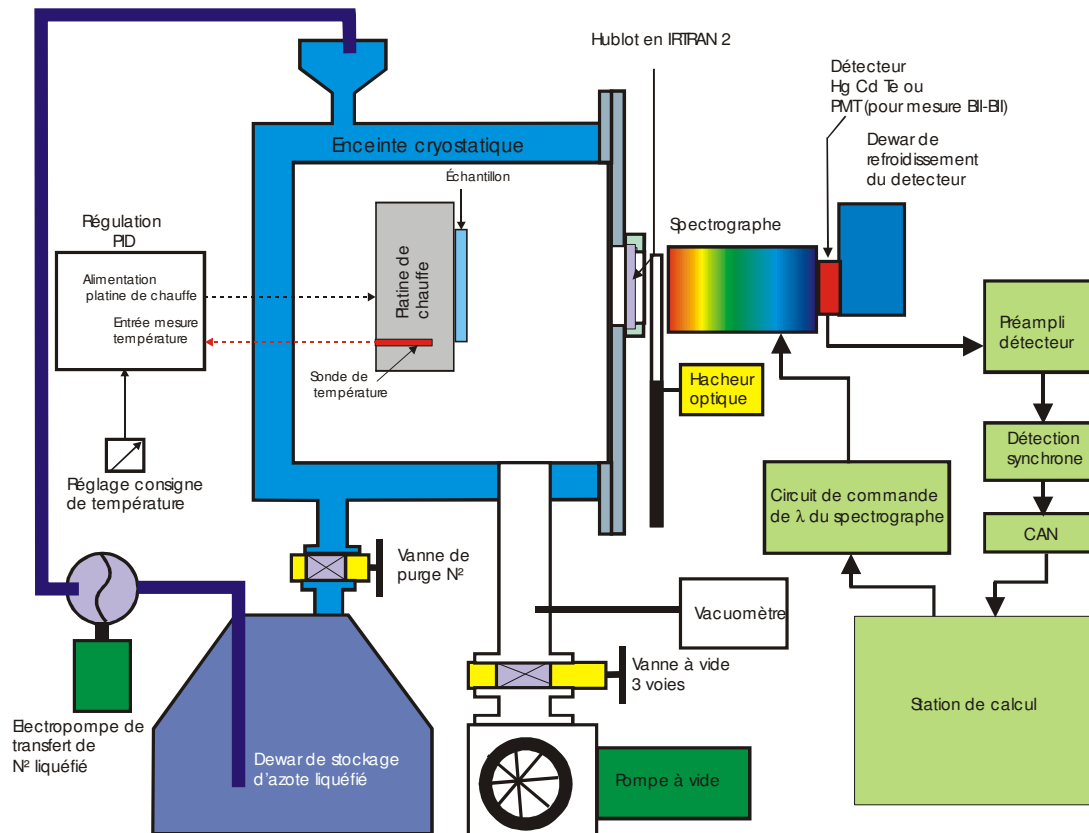


Fig 5 Principe de mesure d'émissivité spectrale par mesure directe avec utilisation d'un puit thermique (système utilisé par CEA DAM et CREA)

Le système de mesure avec le puit thermique permet aussi selon l'architecture de l'enceinte de faire des mesures d'émittance hémisphérique totale. Du fait que la chambre de mesure est refroidie, les températures de mesures de l'échantillon peuvent être relativement basse  $\theta < 300K$  ce qui permet également une mesure d'émissivité spectrale en BIII

### b) Mesure d'émittance spectrale dans un environnement à température ambiante

Ce système de mesure moins lourd que le précédent (absence de puit thermique) nous oblige à avoir une température d'échantillon assez élevée 490-500K pour avoir un rapport signal sur bruit permettant d'avoir des mesures exploitables. Pour les mêmes problèmes de S/B, ce système de mesure intéressant BII est difficile à exploiter en BIII

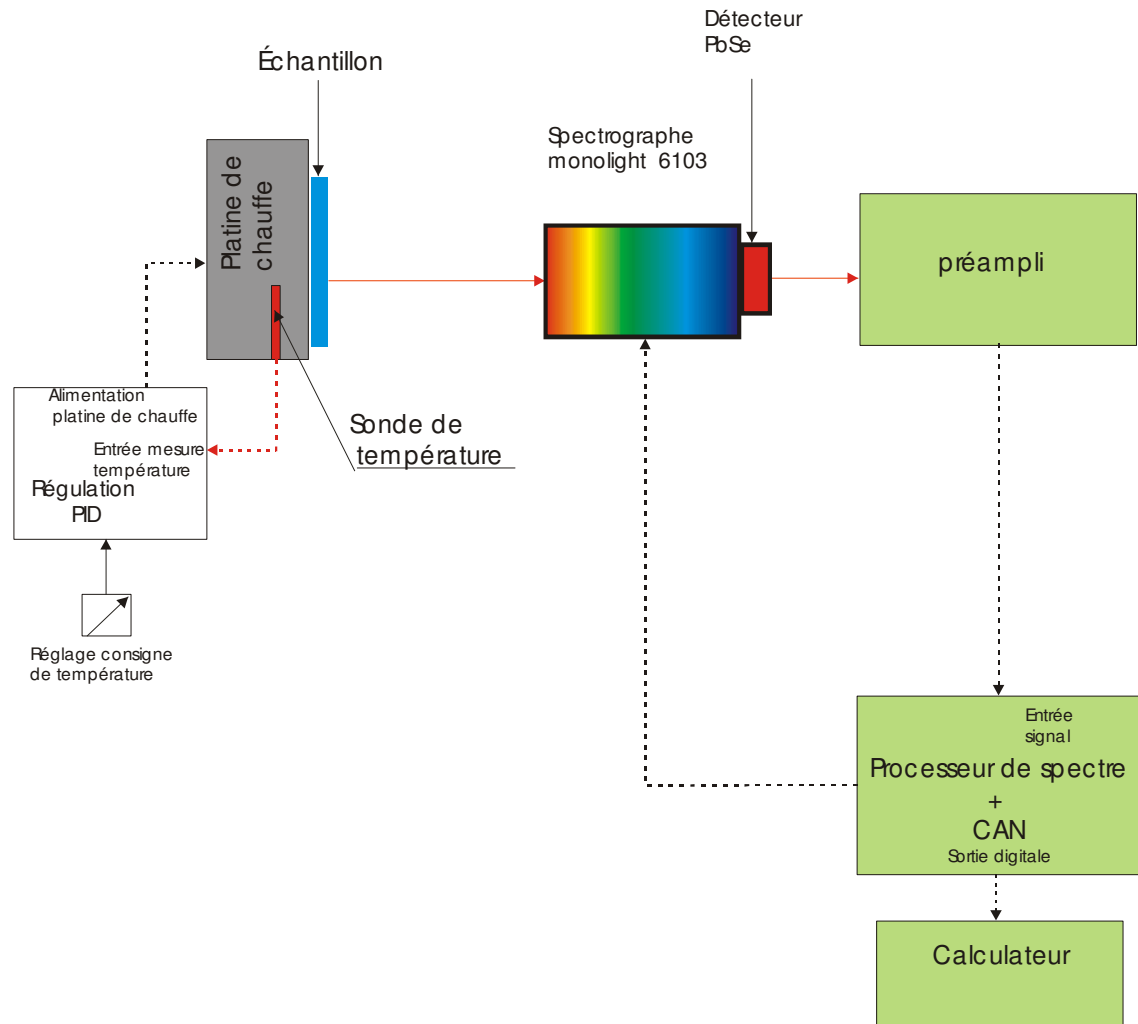


Fig 6 Principe de mesure d'émissivité spectrale par mesure directe BII (système utilisé par LPRL)



### II.3.2 Limites et avantages de ce principe de mesure.

#### Avantages

Cette mesure d'émittance spectrale permet d'analyser le comportement thermo-optique des matériaux longueur d'onde par longueur d'onde de manière très précise.

#### Inconvénients

Ce système de mesure n'est pas disponible sur le marché de l'instrumentation et requiert des conditions précises et plus complexes de mise en œuvre du fait des faibles niveaux d'énergie mis en jeux, voir tableau ci-dessous.

$\theta$ échantillon (K)	Energie propre rayonnée (W/cm <sup>2</sup> ) en BII	Energie propre rayonnée (W/cm <sup>2</sup> ) en BIII
340	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$2,17 \cdot 10^{-2}$
360	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-2}$
380	$6,1 \cdot 10^{-3}$	$3,46 \cdot 10^{-2}$
400	$9,5 \cdot 10^{-3}$	$4,22 \cdot 10^{-2}$
420	$14,2 \cdot 10^{-3}$	$5,06 \cdot 10^{-2}$

Energie rayonnée par un corps noir à différentes températures en BII et BIII (W/cm<sup>2</sup>)

Si on utilise un pas de mesure de 25 nm, cette énergie est à diviser approximativement par 80 en BII et par 160 en BIII

- Nécessité de mesurer les échantillons à 493K si on n'utilise pas de puit thermique.
- Utilisation d'un puit thermique quasi obligatoire pour les mesures en BIII.
- Mesures exigeant du temps et une certaine rigueur.

## **II .4 Mesure directe large bande.**

### II.4.1 Principe

Dans ce système de mesure, on utilise un détecteur de type MCT couvrant la bande II et III qui regarde directement la surface dont on veut mesurer l'énergie rayonnée. Entre le détecteur, et la cible on intercale un filtre passe bande (large bande) qui laisse passer le rayonnement entre :

- 3 et 5  $\mu\text{m}$  ou 3,7 4,8  $\mu\text{m}$  pour la BII
- 8 et 12  $\mu\text{m}$  pour la BIII

On peut aussi découper chaque bande en prenant des filtres passe bande (à bande étroite) en découpant la bande d'analyse par pas de 500nm en BII et 1  $\mu\text{m}$  en BIII voir tableau ci dessous

Longueurs d'onde de coupure pour l'analyse BII	Longueurs d'onde de coupure pour l'analyse BIII
3-3,5 $\mu\text{m}$	8-9 $\mu\text{m}$
3,5-4 $\mu\text{m}$	9-10 $\mu\text{m}$
4-4,5 $\mu\text{m}$	10-11 $\mu\text{m}$
4,5-5 $\mu\text{m}$	11-12 $\mu\text{m}$

Exemple de filtres passe bande utilisable

Le schéma fig.7 nous décrit le principe de la mesure d'émissivité large bande

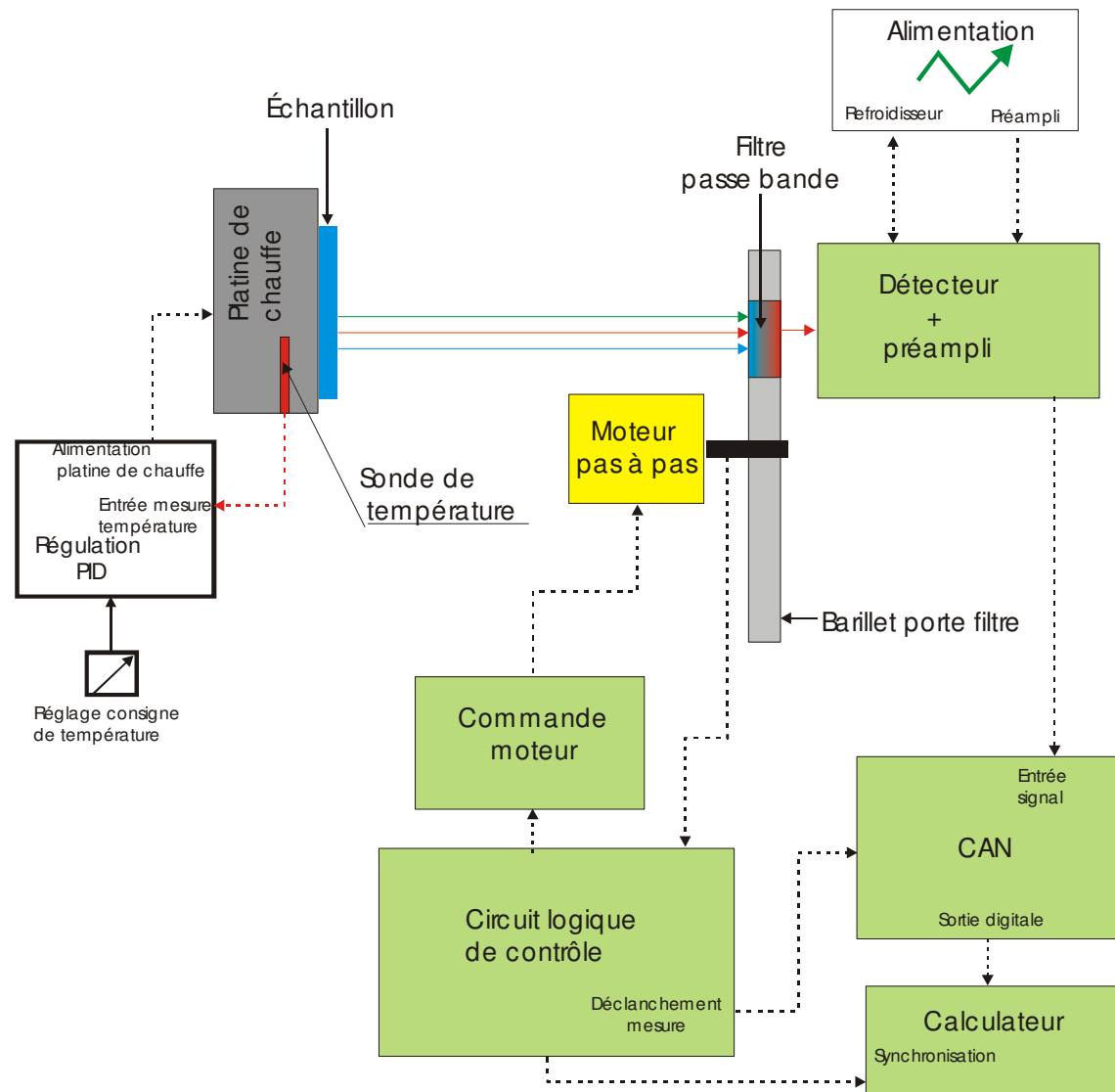


Fig.7 principe de la mesure par analyse large bande

#### II.4.2 Limites et avantages de ce principe de mesure

##### Avantages

Ce montage de mesure présente un bon compromis entre la précision d'analyse spectroradiométrique et la mesure par thermographie. Ce type de mesure permet d'analyser (de manière moins précise que l'analyse spectroradiométrique) le comportement thermo-optique du matériau.

Température des matériaux à analyser plus faible qu'en spectroradiométrie.

Un seul banc de mesure nécessaire pour l'étude BII et BII

##### Inconvénients

Système d'analyse non disponible sur étagère d'où une mise au point nécessaire

Disponibilité des composants optiques incertaine d'où peut être nécessité de fabrication spéciale (notamment pour les filtres).

## II .4 Mesure directe par caméra infra rouge.

### II.4.1 Principe

#### a) Mesures effectuée par Thomson DAO

On fait une analyse thermique comparative entre un échantillon d' $\epsilon$  connu et un échantillon de matériau à effet thermo-optique contrôlé (voir descriptif fig 8). ces deux matériaux étant déposés sur un même substrat. L'ensemble substrat échantillons est disposé sur une platine de chauffe. Une sonde de température est disposé sur la surface des échantillons pour mesurer la température réelle de l'échantillon et vérifier que celui-ci est à l'équilibre thermique (ceci pour éviter de fausser la mesure un effet de « baffle »). C'est ce principe de mesure qui a été utilisé pour les thermogrammes effectués par Thomson DAO

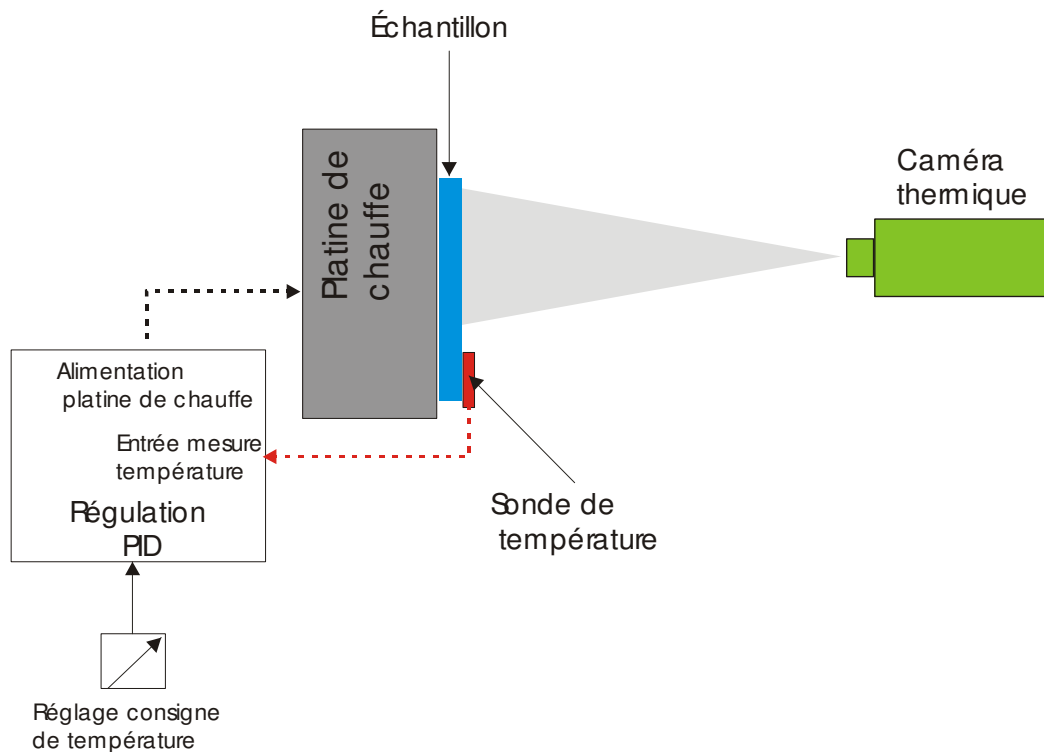


Fig. 8 Principe de la mesure thermographique utilisé par Thomson DAO

## a) Mesures effectuée par GIAT industrie

On fait une analyse thermique comparative entre un échantillon d' $\epsilon$  connu et un ou des échantillons de matériau à effet thermo-optique contrôlé (voir descriptif fig 9). Les matériaux à analyser sont déposés sur un substrat commun et placés dans une étuve climatique. Après stabilisation de la température interne de l'étuve la porte de cette dernière est ouverte et l'analyse thermographique est effectuée.

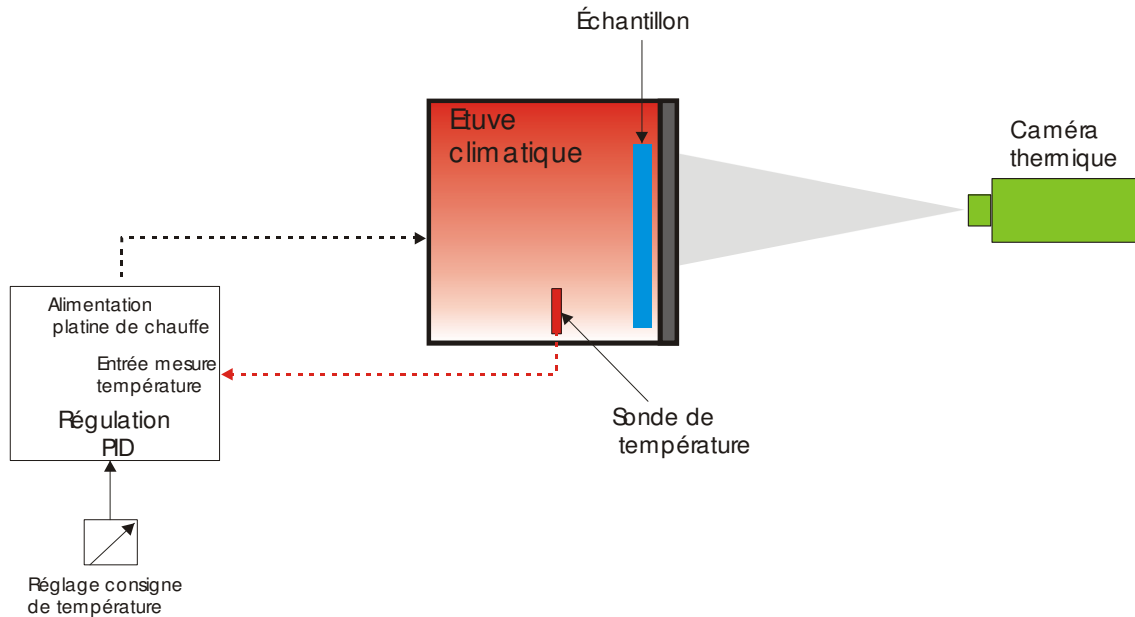


Fig. 8 Principe de la mesure thermographique utilisé par GIAT industrie

#### II.4.2 Limites et avantages de ce principe de mesure

##### Avantages

- On est très proche des conditions opérationnelles d'emploi des matériaux
- Simplicité de la mesure.
- Matériel disponible sur étagère.
- Très parlant au niveau des effets recherchés.

##### Inconvénients

- Nécessité d'avoir un logiciel nous donnant le facteur d'émissance ( si c'est ce paramètre que l'on veut évaluer).
- Coût du matériel (notamment pour une caméra bi-bandes).