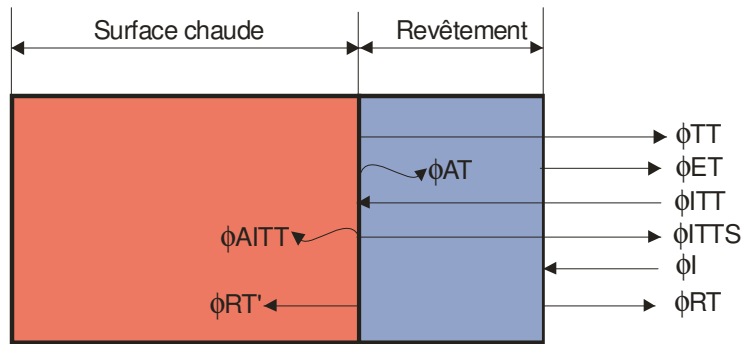


Marc Schiffmann, Brett Kraabel, Philippe Ed. Gravisse
 Laboratoire de Physique du Rayonnement et de la Lumière

I 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



- phi_{TT} Flux émis par la surface chaude et transmis par le revêtement
- phi_{ET} Flux émis par le revêtement furtif (émission propre)
- phi_{ITT} Flux incident transmis par le revêtement furtif
- phi_{ITTS} Flux incident transmis par le revêtement furtif puis réfléchi par la surface chaude
- phi_I Flux incident extérieur (Réflexions solaires ,illuminateurs)
- phi_{RT} Flux incident réfléchi par le revêtement furtif
- phi_{RT'} Flux émis par la surface chaude et réfléchi par le revêtement furtif
- phi_{AITT} Flux incident transmis par le revêtement furtif puis absorbé par la surface chaude
- phi_{AT} Flux absorbé par le revêtement furtif

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

II Corps noir, corps gris

II.1 Loi de Planck

L'émission d'un corps noir répond à la lois dite de "Planck" basée sur des considérations de thermodynamique statistique , cette relation à 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*10⁸m/s)

E_λ = Emittance spectrale W /cm² /μ

h = constante de PLANCK (6,63 *10⁻³⁴ J/S)

T = température en K

II.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 :

λ =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

II.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 :

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

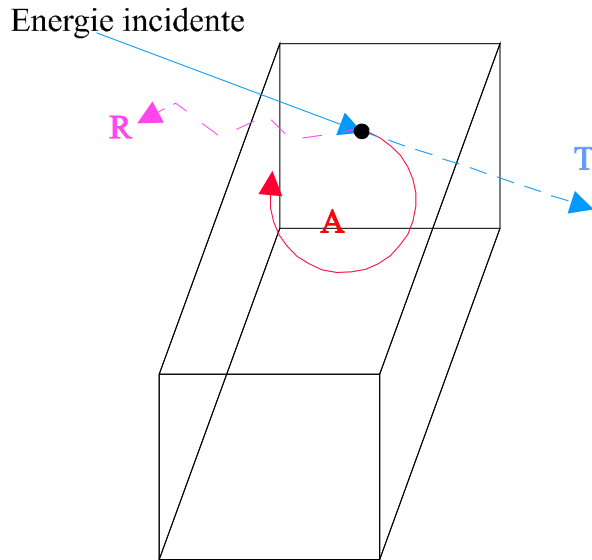
où :

E = Energie rayonnée en W/cm²

ε = Emissivité (=1 dans le cas du corps noir)

σ = Constante de STEPHAN-BOLTZMANN (5.673*10⁻¹² W/(cm²*T⁴))

T = Température en K



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 transmis par le corps ,une partie A est absorbée par le corps et une partie R est réfléchiée par le corps Fig.2. Ces 3coefficients (Absorption,Réflexion,Transmission) sont liés par la relation :

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

où :

R_{λ} = Réflexion spectrale

T_{λ} = Transmittance spectrale

A_{λ} = Absorption spectrale

Fig.2 Loi de KIRCHHOFF

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

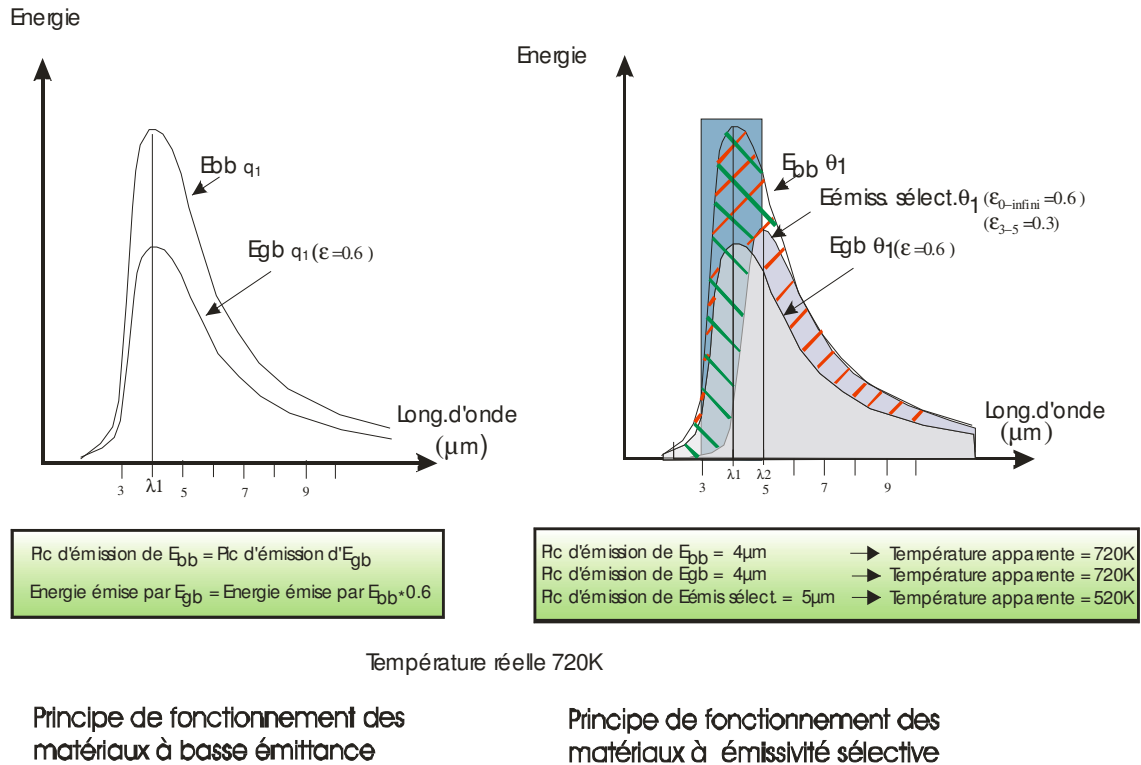


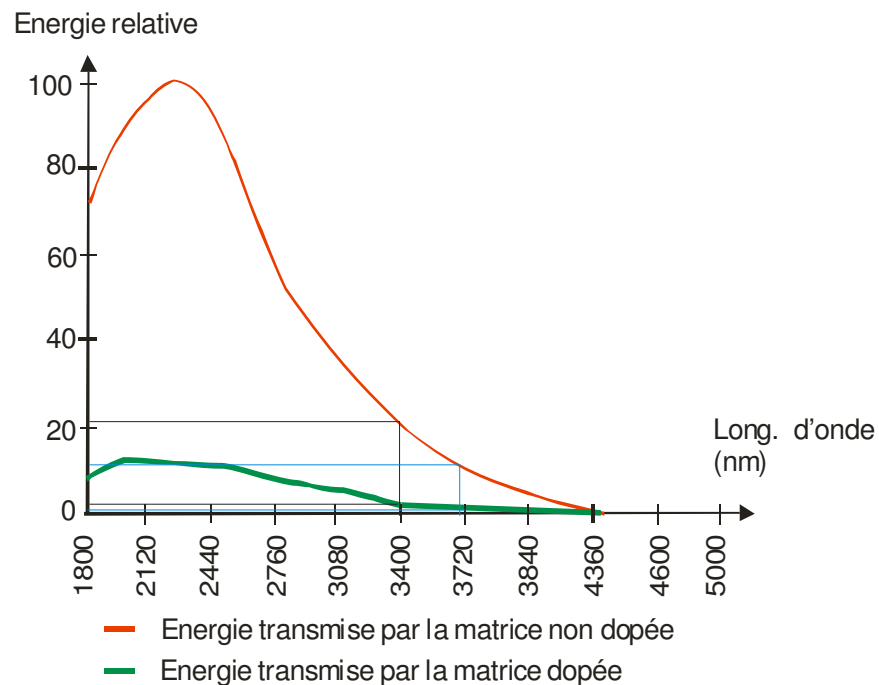
Fig.3 Principe de fonctionnement des matériaux à émittance sélective

III Vérification expérimentale de la non application de la loi de Kirchhoff aux matériaux à émissivité sélective

On a mesuré pour un même matériau la transmittance, la réflectance et l'émittance pour vérifier l'application de la loi de Kirchhoff à ce même matériau. Le matériau IR-RAM considéré est du type C3 2205 2

III.1 Mesure de transmittance

La courbe Fig.4 nous donne les énergies relatives transmises par une matrice support type silicone qui est neutre (courbe rouge) et par la même matrice support dopée avec un matériau à émittance sélective type C3 22305 2. Le coefficient de transmittance de la SA étant obtenu par le rapport d'énergie entre ce deux courbes.

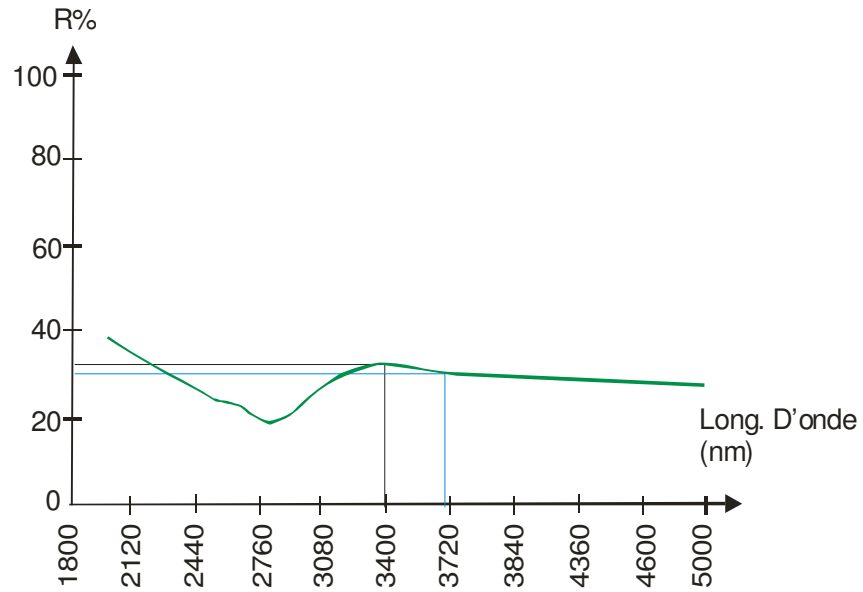


A 3,4 µm le matériau dopé ne transmet que 10% de l'énergie
A 3,7 µm le matériau dopé ne transmet que 10% de l'énergie

Fig 4 Mesure de l'énergie transmise par une matrice dopée par une SA de type C32205 2

III.2 Mesure de réflectance.

On effectue alors une mesure de réflectance spectrale (hémisphérique totale) de ce même matériau dont la courbe de réflectance spectrale nous est donnée Fig.5.

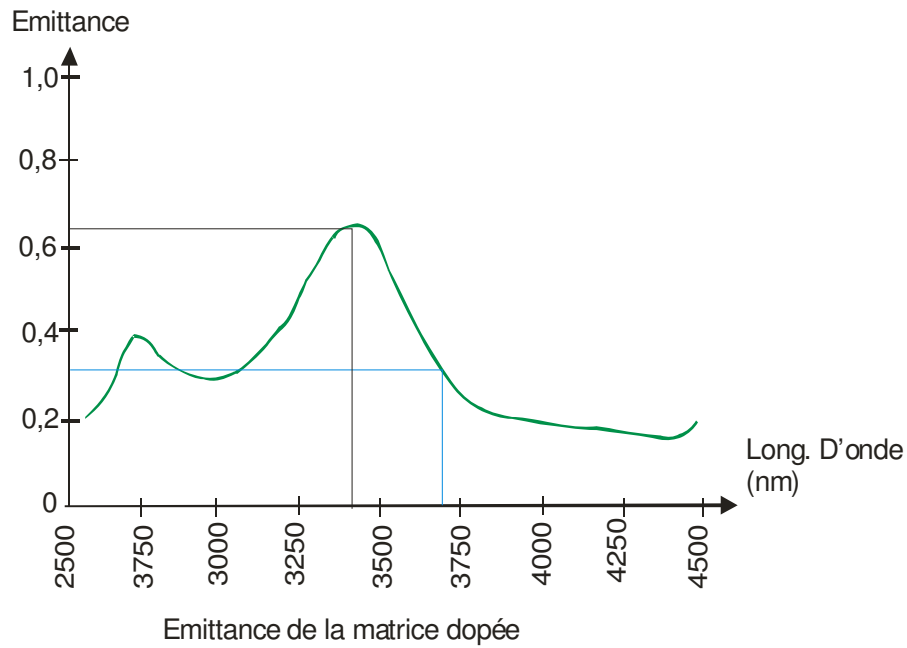


A 3,4 μm le matériau dopé à une réflectance de 34%
A 3,7 μm le matériau dopé à une réflectance de 30%

Fig.5 courbe de réflectance du matériau C3 2250 2

III.2 Mesure d'émittance spectrale

La figure 6 nous donne la courbe d'émittance spectrale du matériau type C3 2205 2 à 520K.



A 3,4 μm le matériau dopé à une émittance de 0,64
 A 3,7 μm le matériau dopé à une émittance de 0,32
 Son pic d'émission est situé au alentour de 3,4 μm

Fig.6 courbe d'émittance spectrale du matériau C3 2252 à 520 K

III.4 Conclusions

Selon la loi de Wien un corps noir ou gris ayant son pic d'émission à 3,4 a une température d'environ 852K or le matériau n'est qu'à 520K. Il est alors difficile de faire des prédictions sur la température réelle à laquelle se trouve le matériau. Il faut alors intégrer les notions de température apparente et réelle.

Le tableau ci-dessous nous rappelle les mesures de T%, R% et ϵ à 3,4 et 3,7 μm

Long.d'onde (μm)	T%	R%	ϵ
3,4	10	34	0,64
3,7	10	30	0,32

Or selon la loi de Kirchhoff on devrait avoir :

A 3,4 μm une absorption de 0,66 soit une émissivité de 0,66* ce qui est cohérent
A 3,7 μm une absorption de 0,6 soit une émissivité de 0,6* ce qui représente un écart de 0,28

On voit donc que les prédictions de la loi de Kirchhoff pour mesurer les caractéristiques radiatives d'un matériau à émissivité sélective ($A+T+R \neq 1$) ne sont pas valides.

* La loi de Kirchhoff dit que toute longueur d'onde absorbée par un corps doit être réémise par ce corps à cette même longueur d'onde et en quantité équivalente (à l'équilibre thermique bien évidemment).