

MATERIAUX A EFFETS THERMOOPTIQUES CONTROLES

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

Principe de l'émissivité sélective appliquée aux matériaux Furtifs Infrarouges compatibles RAM (Radar Absorption Matériaux) hyperfréquences.

I INTRODUCTION

Pour faire face aux différentes menaces d'un champ de bataille dans le domaine du rayonnement électromagnétique infrarouge (menaces télémétrique laser, autodirecteurs de missiles, cameras thermiques) LPRL développe des revêtement et matériaux destinés à:

- Diminuer la distance pratique de télémétrie laser adverse .
- Perturber la signature infrarouge des surfaces chaudes des aéronefs, véhicules et infrastructures militaires du champ de bataille dans les bandes II et III .
- Assurer la discrétion infra rouge des matériels sous bâches et filets dans les bandes II et III .
- Pour mener à bien ces études et développements LPRL s'est associé avec la société BLANCOMME pour assurer l'industrialisation de ces matériaux .

CHAPITRE II

REDUCTION DE LA SIGNATURE INFRAROUGE EN BANDE II ET III.

II.1 ANALYSE DU PROBLEME.

Les matériaux BII et BIII sont destinés à perturber l'émission infrarouge d'une surface chaude émise par un mobile terrestre ,aérien ou marin dans les bandes de longueurs d'onde situées entre 3 et 5 μm et entre 8 et 12 μm correspondant aux bandes de transmission atmosphériques voir fig.1.

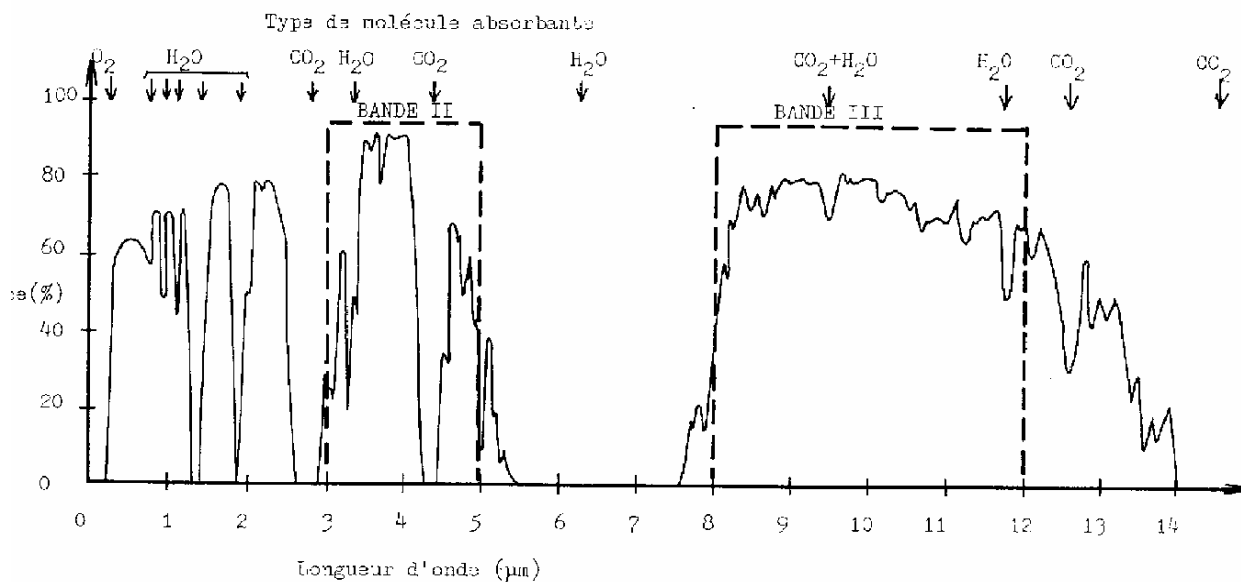


FIG.1 Transmission atmosphérique au niveau de la mer sur une épaisseur de 1852 mètres (hauteur d'eau précipitable 17 mm).

L'énergie rayonnée peut être maximale entre ces 2 bandes (entre 5 et 8 microns) et au delà de 12 microns ainsi qu'en deçà de 3 microns .La fig.2 nous permet de situer les bandes infrarouge dans le spectre électromagnétique.

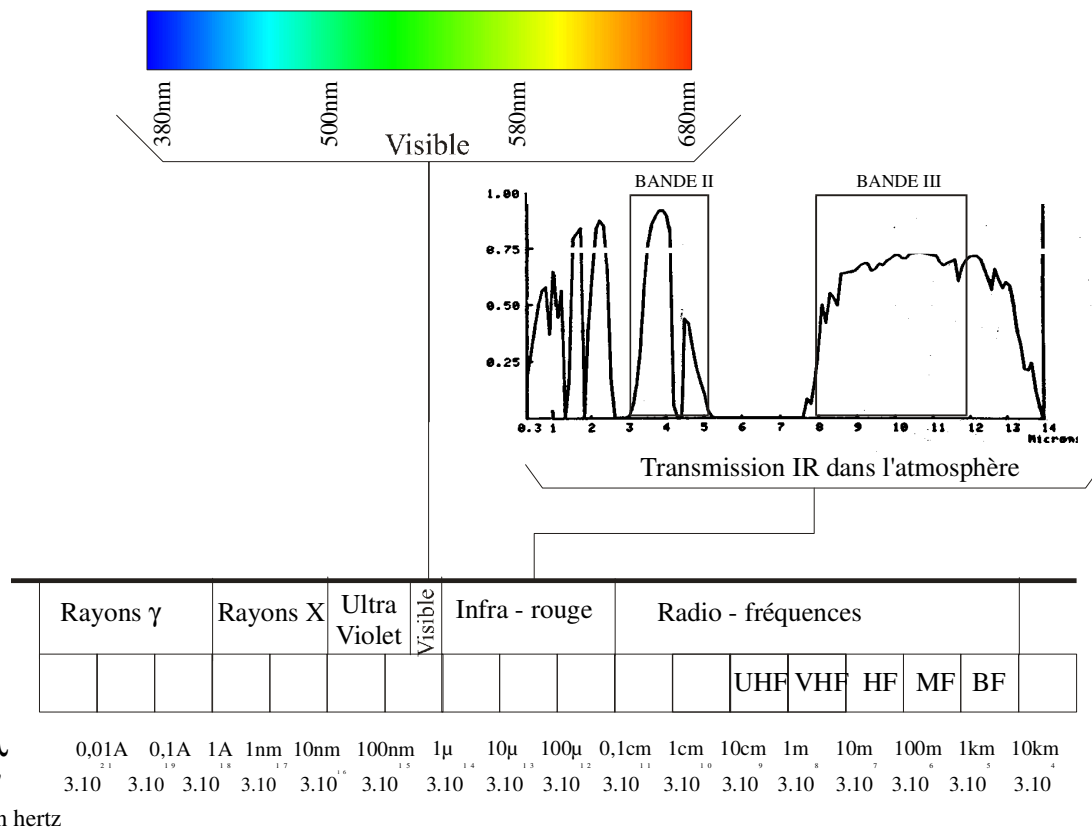


FIG.2 Spectre électromagnétique.

II 2 ENERGIES MISES EN JEU.

En fonction des domaines spectraux à traiter les énergies maximales mises en jeu sont les suivantes pour un corps noir théorique :

- Un corps noir à une température de 700 K émet 1.368 W/M^2 dont environs 30% en bande II et 16% en bande III ,l'émission relative maximum est située à 4,1 microns.
- Un corps noir à une température de 420 K émet $0,177 \text{ W/M}^2$ dont environs 5% en bande II et 28% en bande III ,l'émission relative maximum est située à 6,9 μm .
- Un corps noir à une température de 300 K émet $0,46 \cdot 10^{-3} \text{ W/M}^2$ dont environs 1% en bande II et 26% en bande III ,l'émission relative maximum est située à 9,6 μm .

La figure 3 nous donne les courbes d'émission spectrale d'un corps noir à différentes températures et le tableau 1 nous donne les pics d'émission de ce corps noir pour différentes températures.

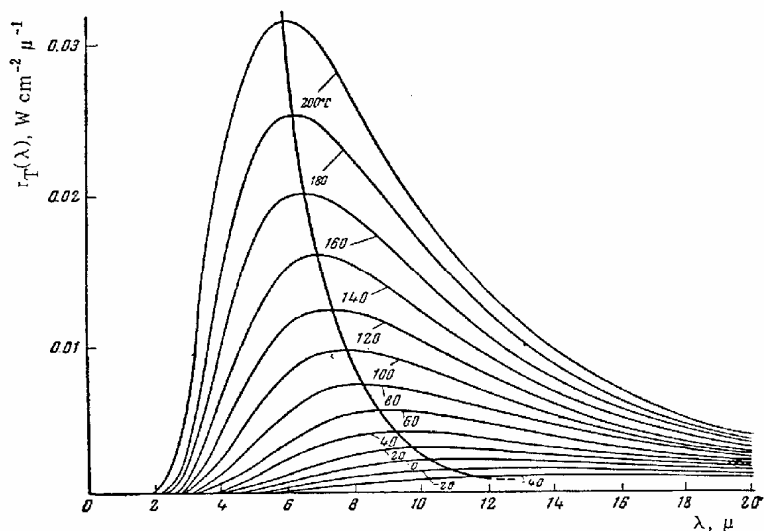
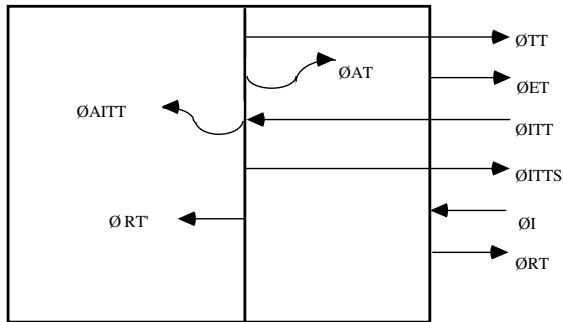


FIG. 3 Courbes d'émission d'un corps noir à différentes température

| Température(K) | Energie émise (W/cm2) | Pics d'émission (micron) . |
|----------------|-----------------------|----------------------------|
| 200 | 9,1190*10-3 | 14,4 |
| 240 | 1,8909*10-2 | 12,00 |
| 260 | 2,6045*10-2 | 11,077 |
| 280 | 3,5032*10-2 | 10,286 |
| 300 | 4,6165*10-2 | 9,60 |
| 320 | 5,9763*10-2 | 9,00 |
| 340 | 7,6163*10-2 | 8,470 |
| 360 | 9,5728*10-2 | 8,00 |
| 380 | 1,1884*10-1 | 7,5789 |
| 400 | 1,4590*10-1 | 7,20 |
| 420 | 1,7735*10-1 | 6,8571 |
| 440 | 2,1362*10-1 | 6,5455 |
| 460 | 2,5519*10-1 | 6,2609 |
| 480 | 3,0255*10-1 | 6,00 |
| 500 | 3,5621*10-1 | 5,76 |
| 520 | 4,1672*10-1 | 5,538 |
| 540 | 4,8462*10-1 | 5,333 |
| 560 | 5,6050*10-1 | 5,143 |
| 580 | 6,4497*10-1 | 4,965 |
| 600 | 7,3864*10-1 | 4,80 |
| 620 | 8,4216*10-1 | 4,645 |
| 640 | 9,5020*10-1 | 4,50 |
| 660 | 1,0814*10-0 | 4,363 |
| 680 | 1,2186*10-0 | 4,2353 |
| 700 | 1,3684*10-0 | 4,114 |
| 720 | 1,5316*10-0 | 4,00 |
| 740 | 1,7091*10-0 | 3,891 |
| 760 | 1,1094*10-0 | 3,7895 |
| 780 | 2,1096*10-0 | 3,6923 |
| 800 | 2,3345*10-0 | 3,60 |

Tableau 1 Pics d'émissions d'un corps noir à différentes températures

III DIFFERENTS MOYENS POUR DIMINUER LA SIGNATURE IR D'UNE SURFACE CHAUDE(Voir figure4).



- ØTT Flux émis par la surface chaude et transmise par le revêtement furtif.
ØET Flux émis par le revêtement furtif (émission propre).
ØITT Flux incident transmis par le revêtement furtif.
ØITTS Flux incident transmis par le revêtement furtif puis réfléchi par la surface chaude.
ØI Flux incident extérieur.
ØRT Flux incident réfléchi par le revêtement furtif.
ØRT' Flux émis par la surface chaude et réfléchi par le revêtement furtif
ØAITT Flux incident transmis par le revêtement furtif puis absorbé par la surface chaude

Fig.4 Modèle simplifié des échanges radiatif au sein d'une surface

III.1 MATERIAUX ISOLANTS

Il est possible de placer sur la surface chaude un revêtement isolant mais l'inconvénient majeur de cette solution est le déséquilibre thermique crée par ce revêtement isolant thermique, car les échanges thermiques par convection avec le milieu ambiant sont modifiés d'ou 2 conséquences:

- L'élévation de la température de la source chaude par perturbation de l'échange calorifique par convection. S'il s'agit d'un groupe propulseur on imagine les conséquences, de même pour les équipements électronique.
- La température de la source chaude augmentant le risque d'élévation de la température du revêtement de camouflage infra rouge s'élèvera d'où une perte partielle de l'acquis escompté de la part de ce type de revêtement. Il est à noter qu'il est difficile d'avoir de forts gradients de température sur une épaisseur similaire à celle des revêtements actuels.

III.2 Matériaux basse émittance.

Les matériaux métalliques dits à basse émittance ont leur émissivité qui est liée à leur conductivité voir Fig.5. Une des solutions envisagée est d'appliquer un revêtement dopé avec des particules cuivreuses ou d'aluminium, le revêtement se comporte alors comme un corps gris dont la courbe d'émission est alors homothétique à celle d'un corps noir théorique à même température. Pour la mise en œuvre d'un tel revêtement il faut que le véhicule (résine) soit transparent ou faiblement émissif en bande II et III si l'on ne veut pas obérer la basse émittance des particules métalliques. Dans le cas de l'étude d'un matériau multifonctions ce revêtement sera difficilement exploitable car il sera réflecteur pour le rayonnement électromagnétique RF (comme pour les surfaces métallique sur lequel le revêtement est déposé). Ce type de revêtement perturbera donc le fonctionnement des surfaces absorbantes radar sur lequel il est déposé. LPRL à néanmoins étudié ce type de matériau basse émittance mais ne l'a pas industrialisé pour des raisons évidentes.

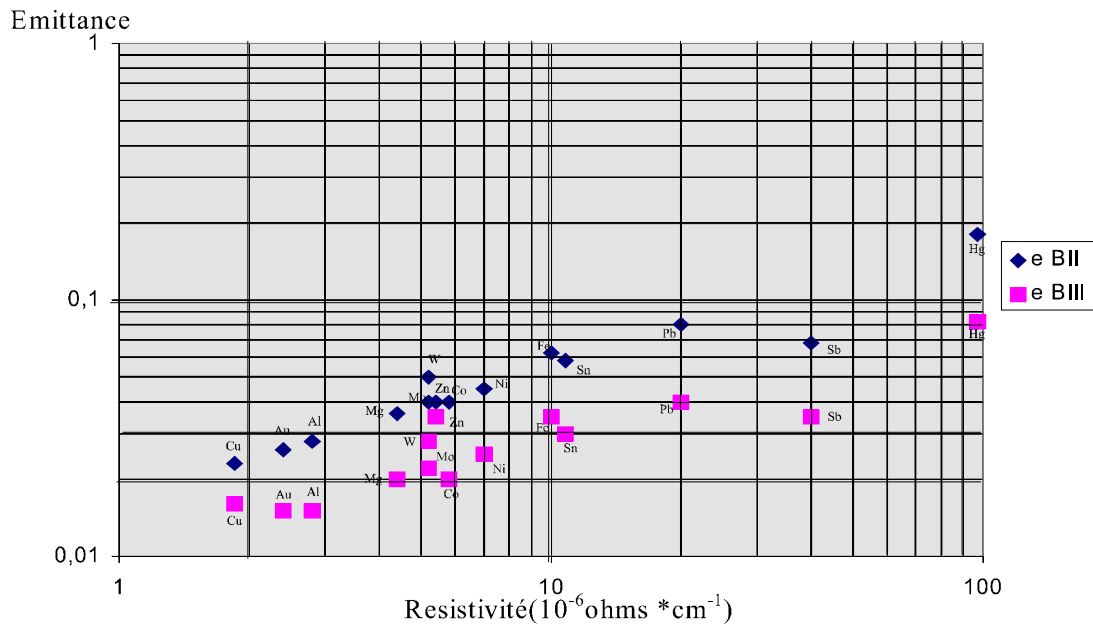


FIG.5 Variation de l'emittance à $4\mu\text{m}$ et à $10\mu\text{m}$ de divers matériaux en fonction de leur résistivité.

III.3 MATERIAUX A EMISSIVITE SELECTIVE ET LUMINESCENT.

III.3.1 Limitations de la loi de KIRCHHOFF appliquée à certains matériaux émissivité sélective et fluorescent

a)Rappel du principe général de la 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 d'un matériau, une partie T de l'énergie est transmise à travers le corps, une partie A est absorbée et une partie R est réfléchi. Ces trois coefficients (Absorption, Réflexion, Transmission) sont liés par la relation:

$$A+T+R=1 \quad (\text{Voir Fig.6})$$

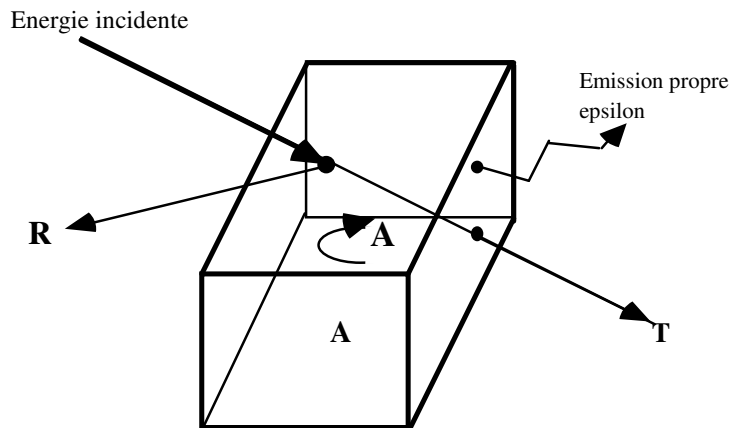


FIG.6 Interaction énergie électromagnétique –matière

Cette relation s'applique spectralement que dans les cas suivant :

- Corps noir ou gris répondant donc à la loi de Planck.
- Corps à l'équilibre thermique.

b) 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 condition 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'emissivité des matériaux ainsi qu'en thermographie infrarouge.

c) Cas du corps gris.

Un corps gris se défini, 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 .

d) Corps sélectifs et luminescents.

Il est évident qu'un corps qui par exemple absorbe un rayonnement ultra violet 365 nm et réemet l'énergie absorbée à une longueur supérieure (loi de stoke)ne respecte pas les conditions d'applications de la loi de kirchoff, 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'emissivité typique d'un corps gris et présentent des écarts par rapport à la loi de Planck.

Pour ce qui concerne les corps à émissivité sélective on peut être représenté comme étant la somme algébrique d'une courbe d'émission d'un corps gris et de la courbe d'absorption/émission d'un corps luminescent (voir Fig.6 bis).

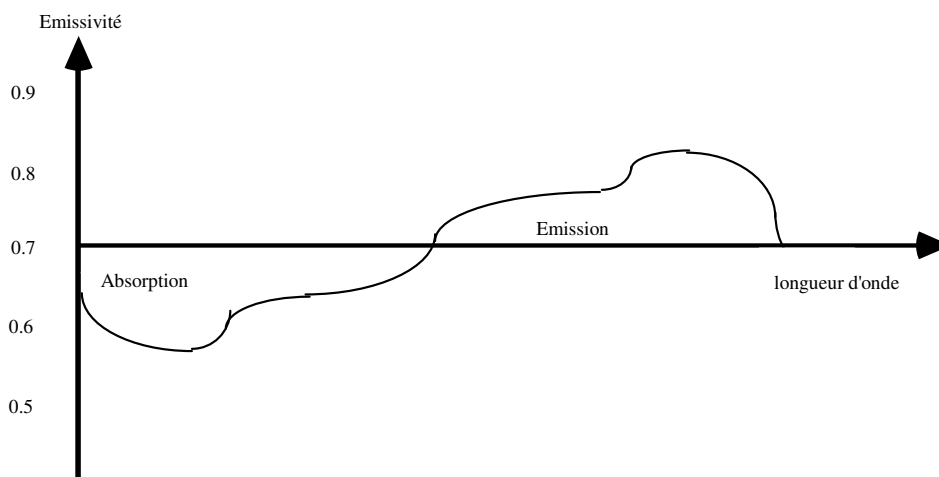


FIG.6 bis: interprétation de la courbe d'emissivité d'un corps à émissivité sélective comme étant la somme algébrique de la courbe d'emissivité d'un corps gris et de la courbe d'absorption/émission d'un substance fluorescente.

III.3.2 Simulation du comportement radiatif d'un matériau à émissivité sélective.

a) Introduction et conditions de calcul.

D'après les caractéristiques d'émissivité spectrale obtenues expérimentalement d'une substance du type Oxyde de Tellure, il a été calculé le comportement radiatif d'un tel matériau entre 2 et 12 μm lorsque il est porté à une température de 440K . Ce spectre est alors comparé à celui d'un corps noir à 440K et à un corps gris de $\epsilon = 0,8$. La série de courbes en fig. 7 nous montre les courbes d'émissivité spectrale des corps noir ,gris, et à émissivité sélective. Il est à noter que l'énergie émise par TeO_2 à 440k est identique à celle du corps gris de $\epsilon = 0.8$; cependant nous voyons bien que la distribution spectrale du TeO_2 est radicalement différente de celle du corps gris.

III.3.3 Analyse détaillée de la simulation.

Nous allons analyser en détail ces spectres d'émission et étudier le comportement des matériaux dans 2 zones à savoir entre 2 et 12 μm en privilégiant les bandes II et III.

a) En bande II.

Cette zone de bande spectrale comprise entre 3 et 5 μm correspond à la bande II militaire. Nous voyons que l'émissivité du TeO_2 est de 0.28 donc le matériau à 440K émet peu par rapport au corps gris d' $\epsilon = 0.80$.

b) En bande III.

Dans cette zone correspondant à la bande spectrale comprise entre 5 et 12 microns, nous voyons que l'émissivité du TeO_2 dans cette bande est de 0,87 alors que le corps gris à toujours son émissivité de 0.81.

c) En conclusion.

Nous voyons que le TeO_2 rayonne une énergie équivalente à celui d'un corps gris d' $\epsilon = 0.81$ entre 2 et 12 μm tout en émettant une énergie équivalente à celle d'un corps gris de $\epsilon = 0,27$ entre 2 et 5 μm

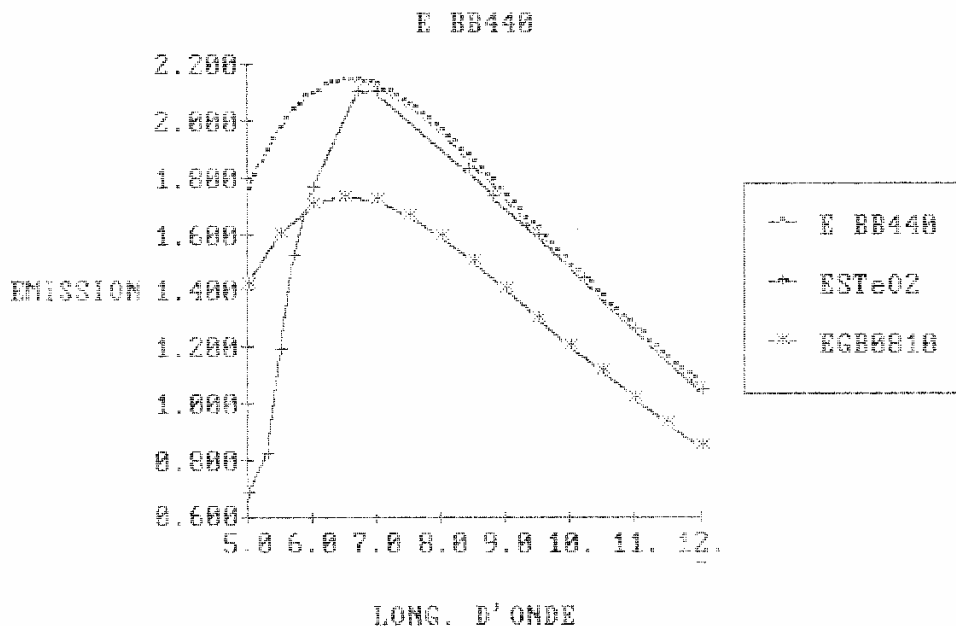


FIG.7 Courbe d'émission spectrale d'un corps noir, d'un corps gris d'epsilon 0,81,et d'un matériau à émissivité sélective à une température de 440K

III.3.4 Intérêt de l'étude de la diminution de la signature infrarouge.

Nous savons que pour régler des caméras thermiques ou des autodirecteurs de missiles il est fait appel à une référence de type corps noir ou gris à une température donnée dont l'émissivité est connue. Par exemple dans le cas de la bande II, si l'on prend un matériau à 550 K dont:

L'émissivité entre 0 et 3 μm est égale à 0.85

L'émissivité entre 3 et 5 μm est égale à 0.3

L'émissivité entre 5 et 15 μm est égale à 0.9

Ce corps émet à 550K :

$1,070 \cdot 10^{-2} \text{ W/CM}^2$ entre 0 et 3 μm

$3,039 \cdot 10^{-2} \text{ W/CM}^2$ entre 3 et 5 μm

$36,68 \cdot 10^{-2} \text{ W/CM}^2$ entre 5 μm et l'infini

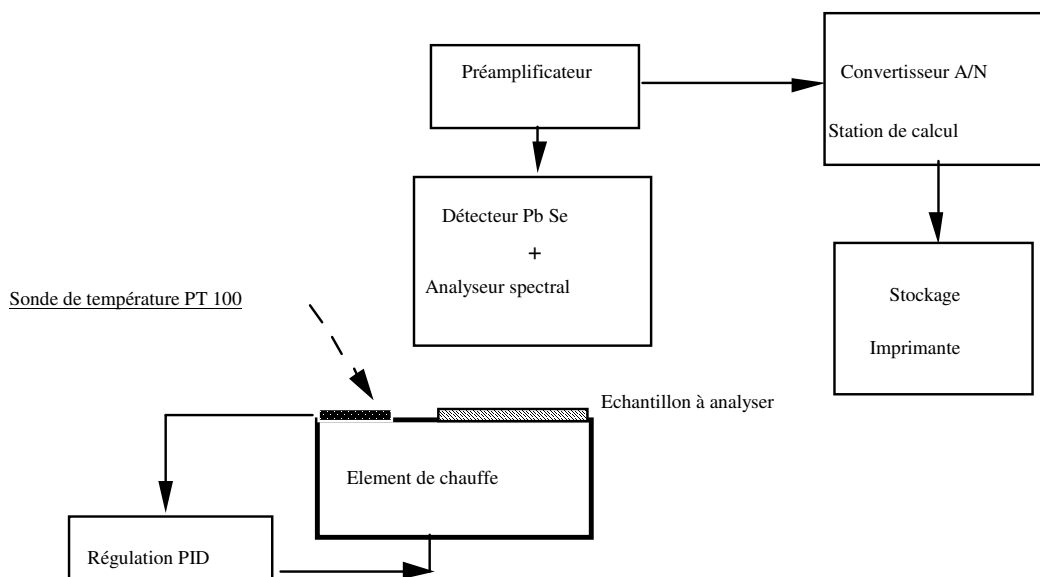
soit une énergie totale rayonnée de $40,79 \cdot 10^{-2} \text{ W/CM}^2$ entre 0 μm et l'infini; ce qui correspond approximativement à l'énergie totale émise par un corps noir ayant une température de 515 K ou à celle d'un corps gris d' ϵ de 0,78 à 550K. La caméra thermique ou l'autodirecteur ayant été étalonné à l'aide d'un corps noir verra ce revêtement comme étant un corps porté à 470K, puisque l'énergie rayonnée en bande II par le revêtement théorique décrit n'émettra que $3,039 \cdot 10^{-2} \text{ W/cm}^2$. La caméra thermique ne verra qu'une surface ayant une "température apparente" de 470 K au lieu des 550 K qui est la température réelle de surface du revêtement. Ceci à pour conséquence de perturber le fonctionnement des caméras thermique en donnant une carte thermique de l'objet faussée par rapport à la réalité. La portée d'un autodirecteur est elle aussi diminuée. Pour la bande III le raisonnement est le même.

IV LES RESULTATS.

Le LPRL sur les bases de ces réflexions développé et produit avec la société BLANCOME des produits dont les émissivités peuvent varier de 0,4 à 0,8. ces produits peuvent être missionnables ou durables. Ce chapitre résume l'état d'avancement des travaux de LPRL dans ce domaine dont certains remontent à 5 ans. Certaines mesures ont été effectuées par des organismes extérieurs par soucis d'objectivité.

IV.1 Principe de mesure utilisé.

PRINCIPE DE MESURE DE L'EMISSIVITE D'UN MATERIAU



Mode opératoire de la mesure d'émissivité avec le montage ci dessus :

On porte l'échantillon à une température de 520K et l'on mesure l'énergie rayonnée par cet échantillon que l'on compare ensuite avec la mesure de l'énergie rayonnée par une référence mesurée avec le même montage et à la même température et dont on connaît l'émissivité spectrale. Par calcul on détermine alors l'émissivité spectrale du matériau LPRL, nous disposons pour ce calcul :

- D'un fichier de données relatives à l'émissivité spectrale de la référence .
- D'un fichier de données relatives aux énergies rayonnées et mesurées sur la référence
- D'un fichier de données liées au bruit de fond générés par la chaîne de mesure .
- 'un fichier de données relatif aux énergies rayonnées et mesurées sur les revêtements LPRL

Le calcul de l'émissivité est réalisé à l'aide d'un petit programme dont l'algorithme est donné ci après (fig.8)

La série de courbes (Emissivité des matériaux LPRL) Fig.9 nous donne les émissivités spectrale de quelques matériaux LPRL.Ces résultats ont été corroborés par des laboratoires extérieurs tels que les laboratoires du CEA DAM(CESTA) et des mesures avec caméras thermique qui rendent compte des effets de tels matériaux sur les énergies rayonnés par les surfaces chaudes ayant subit le traitement avec les matériaux LPRL. Ces mesures ont été faites par les laboratoires de THOMSON CSF (GUYENCOURT) et GIAT INDUSTRIE (BOURGES).Ces mesures thermographiques sont données en annexe I.

Le tableau ci dessous nous donne les émissivité moyennes entre 3,7 et 4,8 μM bande correspondant à la bande II et la Fig.9 les courbes d'emissivité spectrale de certains matériaux LPRL.

| <u>TYPE</u> <u>MATERIAU</u> | <u>DE</u> | <u>EMISSIVITE</u> <u>(3,7 -4,8 μM)</u> | <u>MOYENNE</u> |
|--------------------------------|-----------|---|----------------|
| C322052 | | .36 | |
| C322052V2 | | .34 | |
| C322052V10 | | .50 | |
| C322052B2 | | .52 | |
| C3EOYTT2 | | .44 | |
| C3ZNS2 | | .53 | |

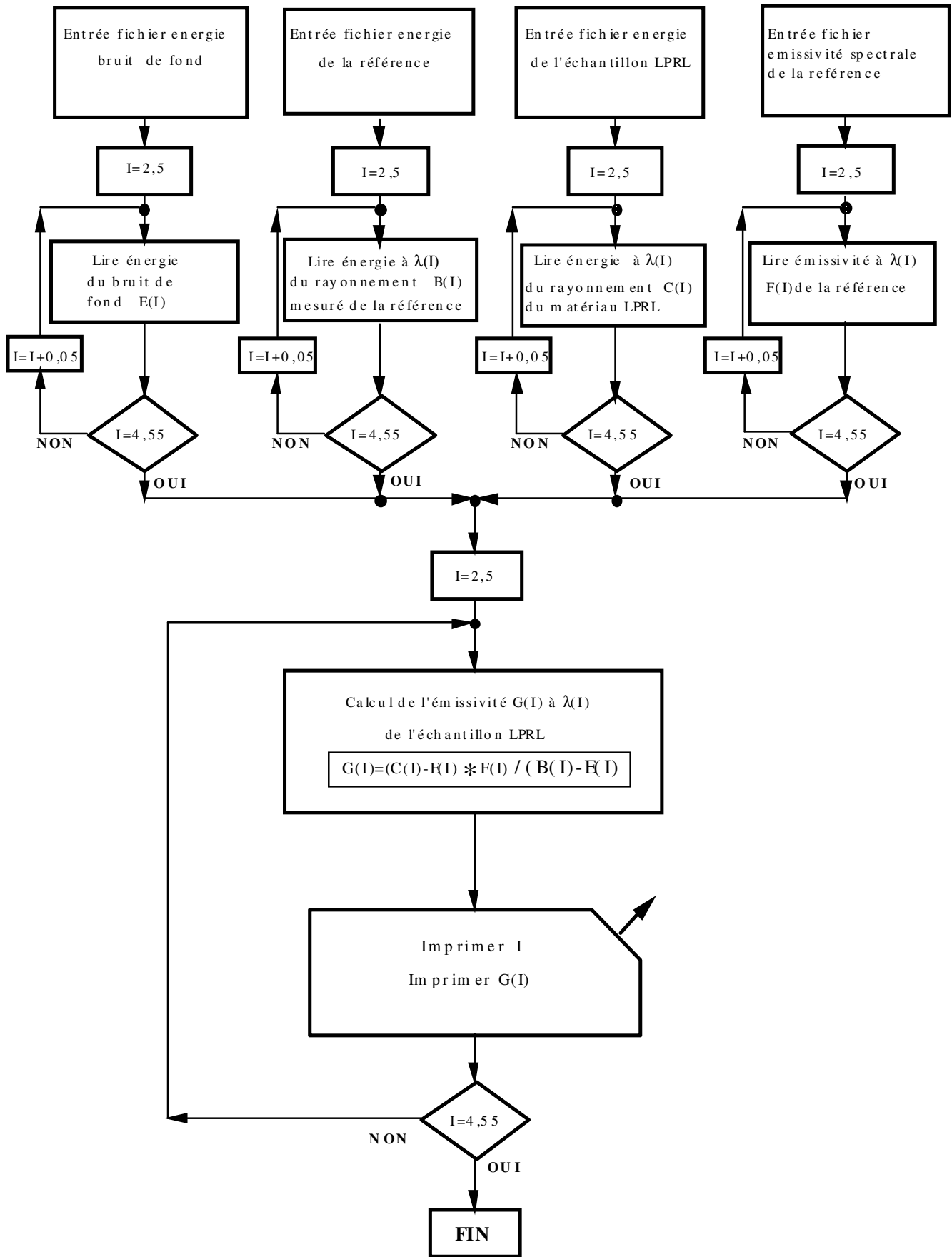


Fig.8 Algorithme du programme de calcul d'emissivité

V Systèmes de contre mesure laser

Il s'agit de recouvrir un engin ,bâtiment ou infrastructure d'un revêtement absorbant le rayonnement émis par un télémètre laser ou système de désignation d'objectifs d'un système d'arme adverse. De cette manière on peut réduire de manière sensible la portée pratique des illuminateurs et télémètres adverses.

VI Principe de Fonctionnement

Le matériau consiste en une résine dopée avec des molécules optiquement actives dont certaines sont fluorescentes . Pour les molécules Fluorescente, leur domaine d'absorption maximale est situé entre 960 et 1085 nm et englobe donc la taie télémétrique 1,06 utilisé par la majorité des télémètres et illuminateurs opérationnels du champ de bataille . L'introduction de ces molécules dans la résine est délicate à cause des phénomènes exciplexes et excimères . L'effet exciplexe résulte de l'interaction entre les molécules dopantes et les molécules voisines de nature différente (en général molécules composants le vernis et autres molécules dopantes). Quand à l'effet excimère il résulte de l'interaction entre les molécules dopantes identiques elles mêmes . L'effet excimère le plus évident est le phénomène d'auto extinction ou les glissements de longueurs d'onde de réémission en fonction de la concentration.

Le matériau mis au point par le LPRL à la différence du système de détection d'alerte LASER, du fait de la forte concentration des substances est proche du phénomène d'auto extinction mais tient compte de la bonne adaptation des index de polarité et de la constante diélectrique du vernis support.

VI CONDITIONS DE MESURE EN LABORATOIRE DE L'ECHANTILLON LAS 1.06 DEMONSTRATEUR

VI 1 BUT DE LA MESURE EFFECTUÉE

Il s'agit de déterminer la réduction de la réflexion laser 1,06 d'une tôle traitée selon le procédé LPRL par rapport à une tôle revêtue d'un vernis PU, homologuée dans l'arme terrestre française. Ces essais sont menés à différentes incidences du faisceau illuminateur.

VI 2 CONDITIONS DE MESURES

On fait des mesures relatives par rapport à une tôle revêtue d'un vernis PU - type OTAN avec des incidences de faisceau de 105° - 95° - 85° - 75° - 65° et 60° . L'angle entre l'axe du faisceau et l'axe de l'entrée du monochromateur du spectroradiomètre est de 15° (schéma de principe du montage de mesure - Fig.10). Le détecteur utilisé est un détecteur Ge, et la source illuminatrice est du type halogène stabilisée.

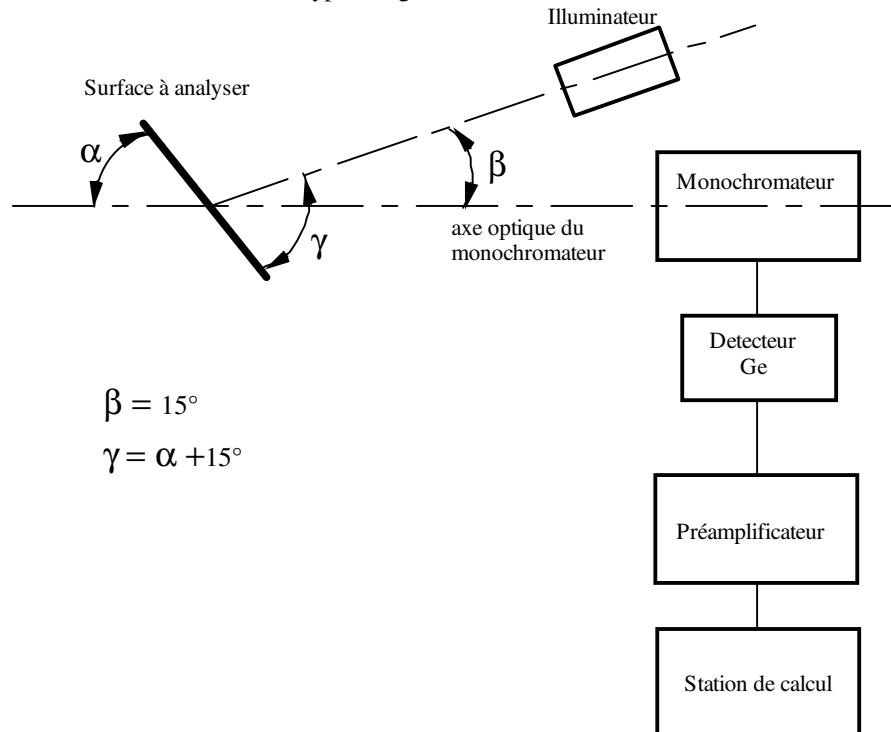


Fig.10 Montage de mesure d'atténuation de réflexion

VI 3 INTERPRETATION DES COURBES

Sur le schéma de principe, on note trois angles qui sont donnés avec une précision + ou - 3°

- L'angle α représente l'angle que fait le plan de l'échantillon/ l'axe optique de l'illuminateur
- L'angle β représente l'angle entre l'axe optique du monochromateur et l'axe optique de l'illuminateur.
- L'angle γ représente l'angle entre le plan de l'échantillon et l'axe optique de l'illuminateur.

Nous voyons sur la série de spectres suivante Fig 11 que pour des angles $< 75^\circ$ nous avons une réflexion sur la tôle traitée par LPRL à 1,06 μM d'environ 1% du signal réfléchi par une tôle standard (revêtue d'un vernis PU homologuée par l'armée de terre française). Pour des valeurs:

A partir de $\alpha = 85^\circ$, nous pouvons voir que l'on a une efficacité moindre du traitement; A cette incidence, la réflexion de la tôle traitée par LPRL représentant 10 % environ du signal réfléchi par une tôle revêtue d'un vernis OTAN.

A $\alpha = 95^\circ$, la réflexion de la tôle avec revêtement LPRL est de 50 %.

A $\alpha = 105^\circ$, la déduction de la réflexion à 1,06 μM de la tôle avec le revêtement LPRL a de nouveau augmentée. Cette réflexion de l'échantillon LAS 1 06 représente quelque % de la réflexion d'une tôle revêtue du vernis PU OTAN.

VI 4 CONCLUSIONS

Les mesures de laboratoire nous permettent de déterminer l'efficacité du système employé ainsi que ses limites.

En effet, on note que l'effet est efficace pour des angles d'incidence compris entre 0 et 80 , et entre 100° et 180°, où la réduction de réflexion due au système LPRL avoisine les 98%

Dans un cône de 10° par rapport à la normale de la surface de la tôle l'effet est atténué.(réflexion spéculaire) Ces résultats de laboratoire ont été confirmés par les essais effectués par la SEFT le 11 juillet 1989 - au Fort d'Issy_les- Moulinaux - avec un télémètre TM18, et ce pour des angles d'incidence de 45°, 60°, 70°,80°,et 90°. (Voire annexe II)On a fait un traitement de surface pour rendre les caractéristiques de l'ambertivité adéquate, (pour éliminer le cône de réflexion spéculaire à+ - 10° (normale à la surface illuminée).

L'échantillon LAS 16 A est l'échantillon ayant subi un traitement de surface. et l'échantillon LAS 16 D est l'échantillon n'ayant pas subi de traitement de surface. Il est à noter que la formulation de ces 2 échantillons est identique.

La série de courbes ci-après (FIG 12)nous montre les rapports de réflexion des échantillons LAS 16 A et LAS 16 D, par rapport à un vernis PU OTAN.,et ce, pour différents angles d'incidence. Nous voyons que les écarts mini-maxi de réflexion en fonction de l'angle d'incidence a été notablement réduit . On note cependant que la réduction du minimum de réflexion a été augmentée et se situe aux alentours de 10%; Ceci nous amènera à réétudier les concentrations des produits actifs. Pour retrouver les caractéristiques d'atténuation et ce pour tous les angles d'incidence.

ANNEXE1

Thermogrammes des matériaux LPRL comparés à des revêtements standards OTAN

ANNEXE 2

Rapport d'essais des matériaux LPRL CML 1,06 de contre mesure laser