

# Caméra Infrarouge

## Avertissement

Dans votre compte rendu, il est impératif que vos graphes soient numérotés, légendés et discutés dans le texte ; il est également important que vos tableaux soient présentés de manière pertinente : **un tableau ou une figure sans légende et dont le contenu n'est pas discuté dans le texte n'a aucune utilité dans un compte rendu.**

## Objectifs :

L'objectif de cette séance de T.P. est de se familiariser avec l'utilisation d'une caméra infrarouge qui permet d'obtenir une cartographie des flux radiatifs issus d'une scène thermique. L'étalonnage de la caméra sera tout d'abord vérifié sur un point face à un corps noir de température donnée  $T^0$ . Puis les influences de l'émissivité de la surface observée ainsi que de son environnement radiatif sur l'image infrarouge seront étudiées.

## 1 Quelques notions sur le rayonnement thermique

Les quelques notions nécessaires en rayonnement thermique figurent dans le texte de T.P. « Rayonnement Thermique ».

## 2 Matériel

### 2.1 Station d'imagerie et de mesure infrarouge



FIGURE 1 – Photo de la caméra infrarouge utilisée. La matrice de microbolomètres est dans le plan focal de l'objectif.

La chaîne de visualisation et d'acquisition d'images infrarouges comprend tout d'abord la caméra infrarouge (modèle A40 fabriquée par FLIR<sup>®</sup>) à matrice dans le plan focal de l'objectif (FPA : Focal Plane Array) dont la surface sensible est constituée d'une matrice de 320 x 240 détecteurs microbolométriques (voir la photo en Figure 1).

La chaîne de visualisation et d'acquisition d'images infrarouges comprend tout d'abord la caméra infrarouge (modèle A40 fabriquée par FLIR<sup>®</sup>) à matrice dans le plan focal de l'objectif (FPA : Focal Plane Array) dont la surface sensible est constituée d'une matrice de 320 x 240 détecteurs microbolométriques (voir la photo en Figure 1).

Cette chaîne est schématisée sur la Figure 2. L'objectif (ou optique sur le schéma) est constitué de lentilles en Germanium (transparent dans l'infrarouge, traité antireflet). La matrice de microbolomètres, placée après l'objectif, reçoit le flux radiatif venant d'une surface de la scène thermique correspondant à la surface conjuguée de la matrice à travers l'objectif de la caméra (voir Figure 2).

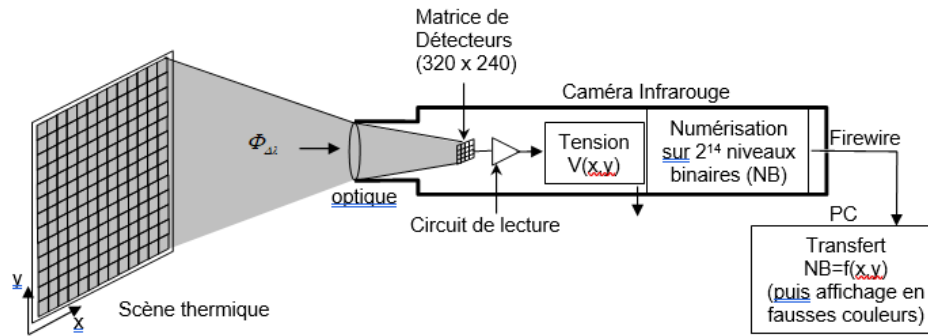


FIGURE 2 – de la scène thermique vers la matrice de détecteurs puis vers l'image infrarouge sur PC.

Chaque détecteur de la matrice est sensible dans la gamme  $7,5\text{-}13\text{ }\mu\text{m}$  (Long Wave LW). Ce type de détecteur n'est pas refroidi (voir les caractéristiques principales de cette caméra en annexe). Ces détecteurs sont des microbolomètres, de la famille des détecteurs thermiques, dont le principe est basé sur l'échauffement du détecteur consécutif à l'absorption du flux infrarouge pendant une durée donnée, appelée 'temps d'intégration'. Cet échauffement du détecteur induit une variation de sa résistance électrique dont la mesure est alors proportionnelle au flux infrarouge absorbé. Les tensions délivrées, alors, par tous les détecteurs de la matrice sont lues au maximum à 50 Hz puis numérisées sur 14 bits. Ces valeurs sont alors transférées vers un PC par un câble Firewire et peuvent être affichées avec un code couleur donné. Le logiciel d'acquisition d'images infrarouges est Thermacam Researcher, dont le manuel est disponible en version pdf sur le même PC.

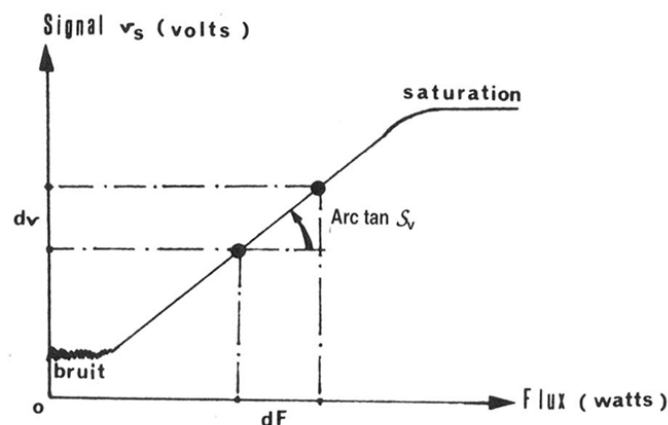


FIGURE 3 – linéarité de la réponse de la caméra en fonction du flux reçu avant saturation

La caractéristique du détecteur, soit la tension qu'il délivre en fonction du flux qu'il reçoit, est linéaire tant que le flux reçu n'excède pas un flux donné dit "de saturation" comme l'indique la Figure 3. La modification du temps d'intégration sur la caméra permet de mesurer des flux d'amplitudes différentes : de faibles flux avec un grand temps d'intégration et de forts flux avec un petit temps d'intégration. À chaque temps d'intégration correspond une courbe d'étalonnage. Deux temps d'intégration sont prévus par le constructeur correspondant à deux gammes de températures de corps noir observé :  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  et  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

## 2.2 Sources radiatives

### 2.2.1 Corps noir

La source radiative de référence (ou « référence thermorayonnante ») utilisée est un corps noir de laboratoire (figure 4). Celui-ci est destiné à approcher au mieux les caractéristiques du corps noir



FIGURE 4 – Corps noir de laboratoire

qui est un objet purement théorique. Il s'agit d'une cavité cylindrique à fond conique, revêtue d'un matériau très absorbant, à facteur de forme élevé (profondeur  $>$  diamètre), chauffée de façon isotherme par des résistances électriques. Il est équipé d'un disque percé de diaphragmes de tailles différentes qui peuvent se placer devant l'entrée de la cavité. La gamme de température qu'il peut couvrir va de l'ambiante à  $1000^{\circ}\text{C}$ , elle est mesurée par une sonde platine en fond de cavité. L'image que l'on a en observant un tel corps noir placé par exemple à  $100^{\circ}\text{C}$  dans un environnement à  $20^{\circ}\text{C}$  est donc un disque ("fort" flux quittant la cavité) se détachant de son environnement ("faible" flux).

### 2.2.2 Cubes multifaces

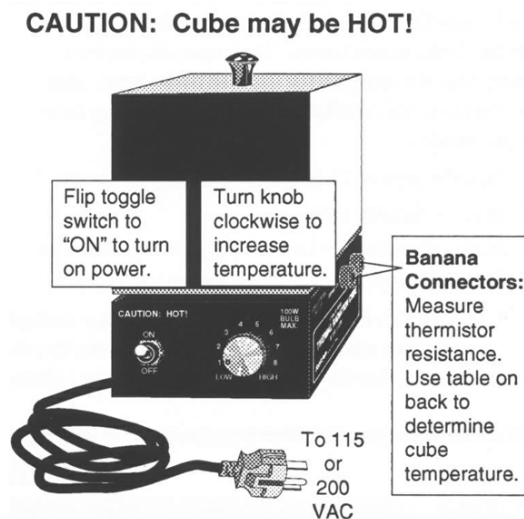


FIGURE 5 – Cube de Leslie

Ces cubes, illustrés à la figure 5, présentent quatre faces latérales en aluminium chauffées par une ampoule de 100 W, placée au centre du cube. La température de chacune des faces peut raisonnablement être supposée égale et uniforme. Elle est réglée en agissant sur la puissance délivrée par la lampe interne et est mesurée par une thermistance placée dans un coin inférieur du cube. La courbe donnant l'évolution de la résistance de la thermistance en fonction de sa température est fournie en salle de TP. Les quatre faces présentent un état de surface différent : peinture noir mat, peinture blanc mat, aluminium non poli, aluminium poli. La réflexion de rayonnement par la face en aluminium poli est de type spéculaire, alors que pour les autres faces, elle pourra être considérée diffuse. Les faces peuvent atteindre au maximum  $130^{\circ}\text{C}$ . **Attention aux brûlures, ne jamais toucher les surfaces, uniquement la base.**

### 2.2.3 Plaque chauffante à différentes émissivités

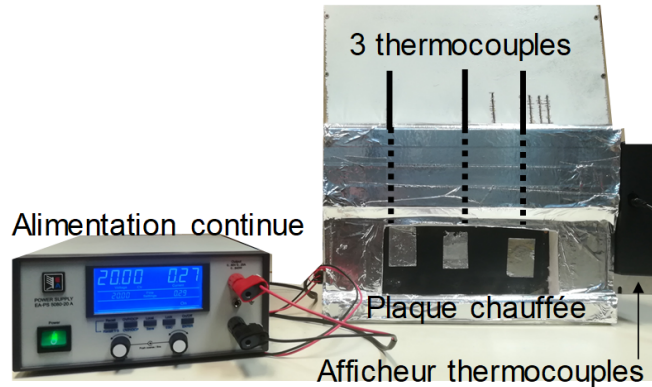


FIGURE 6 – Plaque chauffante à différentes émissivités

Il s'agit d'une plaque en cuivre régulée en température dont la surface est peinte en noir. Localement, comme vous pouvez l'observer sur la figure 6, l'émissivité de la surface a été modifiée par l'ajout d'adhésifs en aluminium (de gauche à droite : adhésif seul, adhésif + scotch blanc, adhésif + vernis). La visualisation de cette plaque par la caméra infrarouge permettra donc de s'intéresser aux conséquences de l'émissivité d'une surface sur son image infrarouge, pour une température identique (que l'on suppose non modifiée par l'ajout de l'adhésif). La plaque est chauffée par une résistance électrique plane collée à l'arrière. Cette résistance est alimentée une alimentation continue. Trois thermocouples sont insérés dans la plaque en cuivre, leurs températures sont affichées sur le boîtier latéral. **ATTENTION DE NE PAS DÉPASSER 20 V POUR CETTE EXPÉRIENCE** sous peine de surchauffer la plaque de cuivre et l'isolant en polystyrène qui l'entoure.

## 3 Travail de préparation : VOIR SUR AMETICE

## 4 Expériences

### 4.1 Observation d'un corps noir (étalonnage) et de surfaces non noires en environnement uniforme

#### 4.1.1 Introduction

L'étalonnage de la caméra consiste à enregistrer sa réponse (en V), pour un temps d'intégration donné, face à un corps noir de laboratoire placé à une température  $T^0$  variable (voir figure 7 à gauche).

L'allure de la courbe obtenue est présentée sur la figure 8. Dans cette situation, la tension  $\Delta V^0(T^0)$  s'écrit de la façon suivante, avec  $R(\lambda)$  la sensibilité spectrale relative du détecteur dans la bande  $\Delta\lambda$  et  $k$  une constante dépendant de la sensibilité maximale (en V/W) du détecteur, du gain de la chaîne d'amplification et des grandeurs relatives à la géométrie de la détection.

$$\Delta V^0(T^0) = k \int_{\Delta\lambda} R(\lambda) L_{\lambda}^0(\lambda, T^0) d\lambda \quad (1)$$

Dans la situation de mesure sur un corps réel d'émissivité monochromatique  $\varepsilon(\lambda)$ , placé dans un environnement uniforme assimilé au corps noir à  $T_a$ , la tension mesurée s'écrit :

$$\Delta V_{mes} = k \int_{\Delta\lambda} R(\lambda) \varepsilon(\lambda) L_{\lambda}^0(\lambda, T) d\lambda + k \int_{\Delta\lambda} R(\lambda) [1 - \varepsilon(\lambda)] L_{\lambda}^0(\lambda, T_a) d\lambda \quad (2)$$

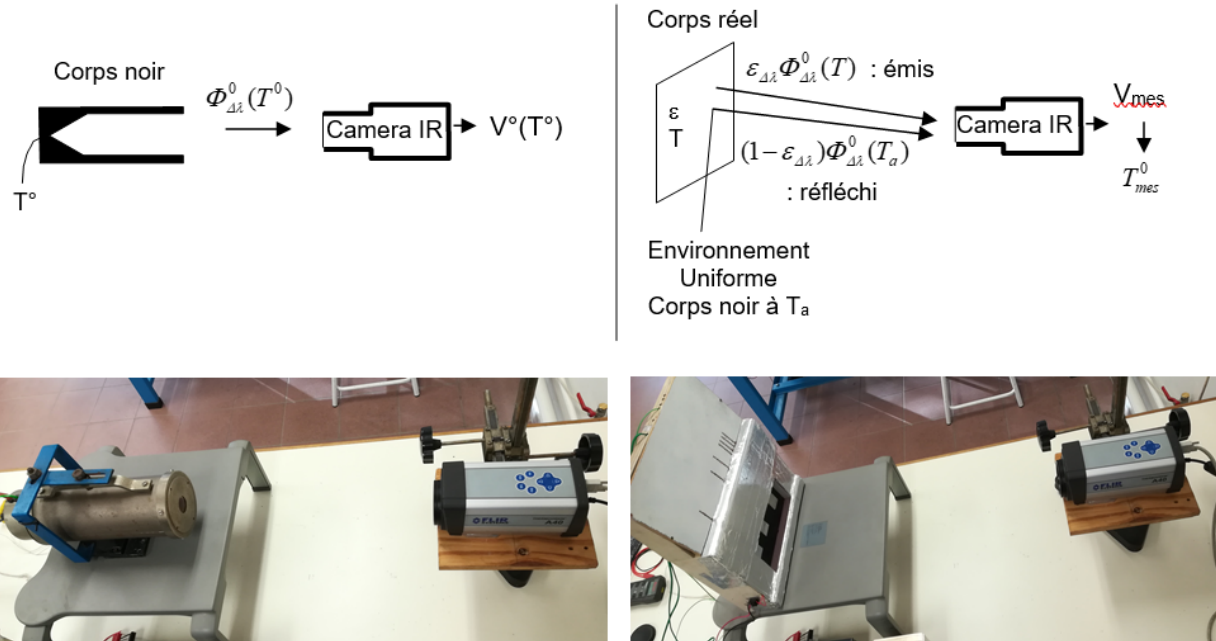


FIGURE 7 – Schéma et photo du montage pour l'étalonnage devant le corps noir de laboratoire (à gauche) et du montage pour la mesure sur un corps réel (plaque chauffante à différentes émissivités, à droite)

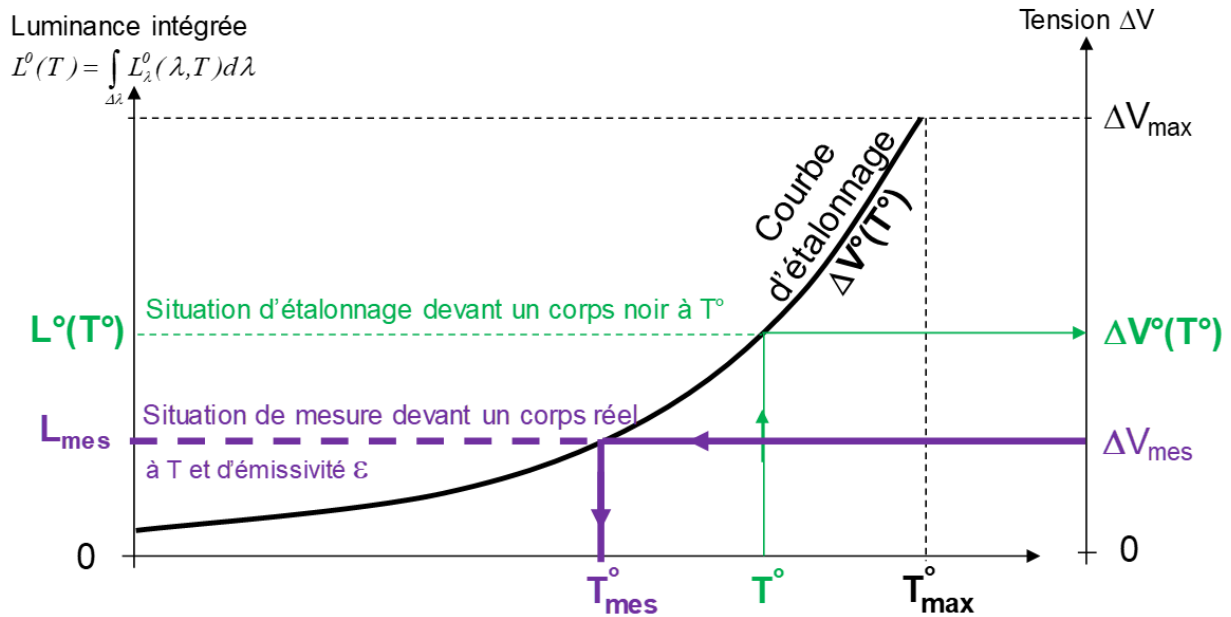


FIGURE 8 – Allure de la courbe d'étalonnage au corps noir  $\Delta V^0 = f(T^0)$  et signification de la température apparente corps noir mesurée  $T_{mes}^0$  sur un corps non noir obtenue à partir d'une  $\Delta V$  mesurée  $\Delta V_{mes}$

et d'après (1), peut se mettre sous la forme :

$$\Delta V_{mes} = \varepsilon_{\Delta\lambda} \Delta V^0(T) + (1 - \varepsilon_{\Delta\lambda}) \Delta V^0(T_a) = \Delta V^0(T_{mes}^0) \quad (3)$$

avec

$$\varepsilon_{\Delta\lambda} = \frac{\int_{\Delta\lambda} \varepsilon(\lambda) R(\lambda) L_{\lambda}^0(\lambda, T) d\lambda}{\int_{\Delta\lambda} R(\lambda) L_{\lambda}^0(\lambda, T) d\lambda} \quad (4)$$

NB : si on définit une sensibilité spectrale moyenne sur la bande spectrale de la caméra  $R(\lambda) = \int_{\Delta\lambda} R(\lambda) L_{\lambda}^0(\lambda, T) d\lambda / \int_{\Delta\lambda} L_{\lambda}^0(\lambda, T) d\lambda = \int_{\Delta\lambda} R(\lambda) L_{\lambda}^0(\lambda, T) d\lambda / L^0(T)$ , alors la tension mesurée (1) peut s'écrire proportionnellement à la luminance intégrée sur  $\Delta\lambda$  :  $\Delta V^0(T^0) = k R_{\Delta\lambda} L^0(T^0)$  (voir figure 8).

$\varepsilon_{\Delta\lambda}$  est l'émissivité spectrale de la surface dans la bande spectrale de la caméra, tenant compte de sa sensibilité  $R(\lambda)$ . La seconde égalité de (3) signifie que l'on peut toujours faire correspondre à la tension mesurée,  $V_{mes}$ , la tension que mesurerait la caméra devant un corps noir à  $T_{mes}^0$ . Cette température,  $T_{mes}^0$ , est appelée *Température apparente corps noir* de la surface. En supposant que la surface observée soit placée dans un environnement uniforme noir à  $T_a$  et en supposant le matériau gris (avec  $\varepsilon = \varepsilon_{\Delta\lambda}$ ) à  $T$ , cette température apparente peut-être reliée aux deux autres températures du système selon la relation suivante, :

$$(T_{mes}^0)^4 = \varepsilon_{\Delta\lambda} T^4 + (1 - \varepsilon_{\Delta\lambda}) T_a^4 \quad (5)$$

#### 4.1.2 Travail à réaliser

- Réaliser l'expérience de la figure 7 (à gauche) et vérifier que la température du corps noir, mesurée par la caméra, correspond bien à sa température affichée sur le régulateur. Bien penser à régler l'émissivité de l'objet observé à la valeur 1 (celle du corps noir) dans Researcher (Image/Settings/Object Parameters/Emissivity).
- Réaliser l'expérience de la figure 7 (à droite) en utilisant la plaque chauffante (**TENSION D'ALIMENTATION SUR 20V MAXI**) à différentes émissivités en guise de cible à observer. Relever la température réelle de la plaque à l'aide des différents thermocouples qu'elle contient.  
Quelles sont les températures apparentes corps noir des différentes surfaces (y compris la peinture noire) qui la composent ? Déterminer leurs émissivités.  
Conclusions sur l'influence de la nature des surfaces sur leur émissivité ?

#### 4.2 Influence d'un environnement non uniforme sur l'observation d'objets non noirs : réflexions parasites

Le schéma de l'expérience à réaliser est présenté en vue de dessus sur la figure 9, la plaque noire perturbatrice est la surface noire du second cube multifaces.

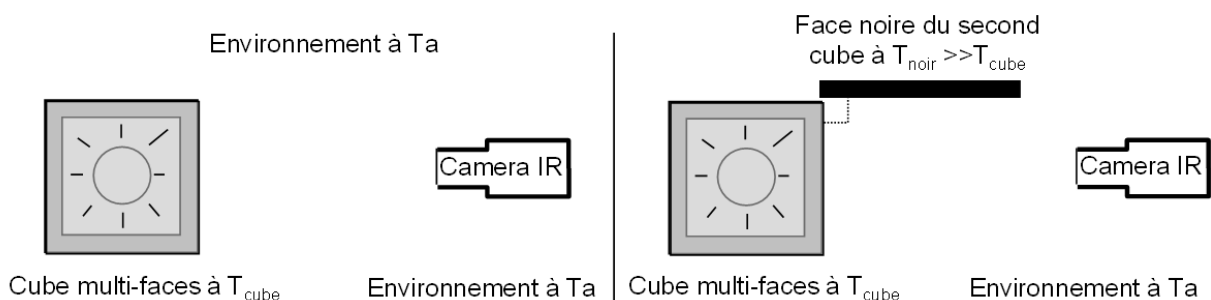


FIGURE 9 – Surfaces de différentes émissivités (3 faces du cube multifaces) observées dans un environnement uniforme (à gauche), puis perturbé par une source de rayonnement chaude et émissive (à droite), qui est la face noire du second cube multifaces

- Chauffer le cube à environ 30 °C (rhéostat autour de 2,5, mesurer  $T_{cube}$  à l'aide de la thermistance du cube) et le second cube au maximum (attention  $T$  avoisine 130 °C).  
Mesurer  $T_a$  à l'aide du thermocouple ambiant.



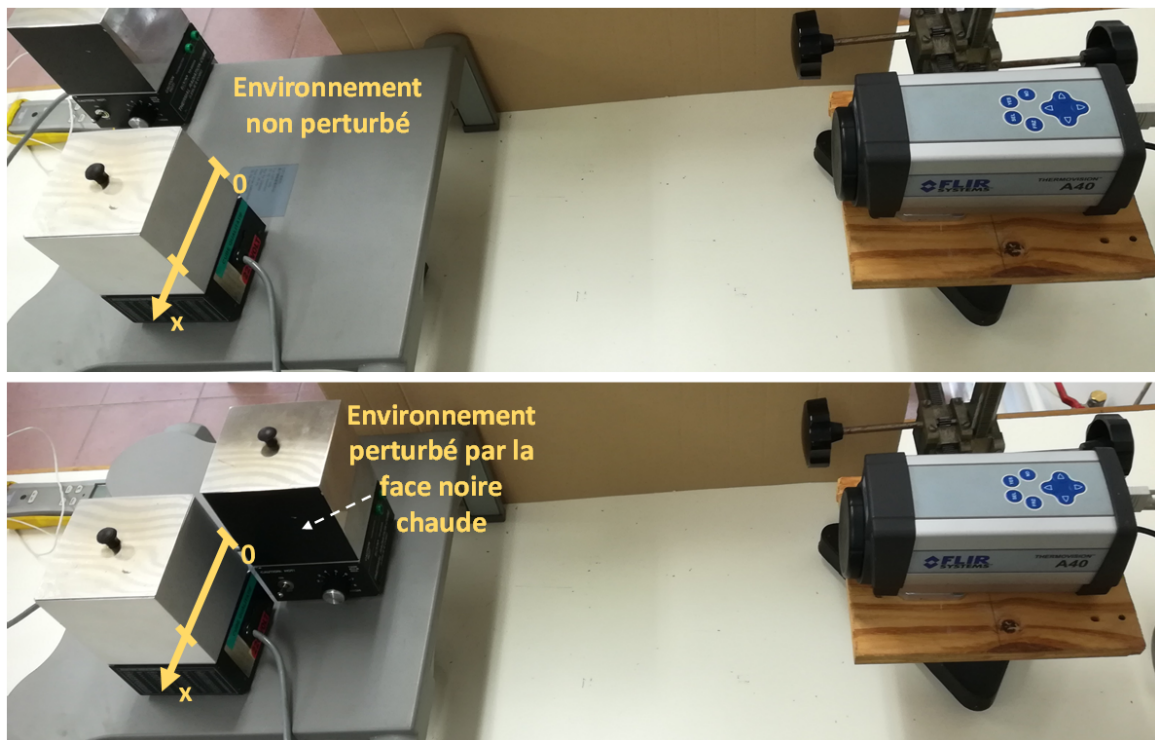


FIGURE 10 – En haut : observation du cube multifaces dans un environnement uniforme. C'est le long de l'axe  $x$  que seront relevées les températures apparentes mesurées par la caméra IR. En bas, l'environnement du cube est perturbé par la face noire chaude du second cube.

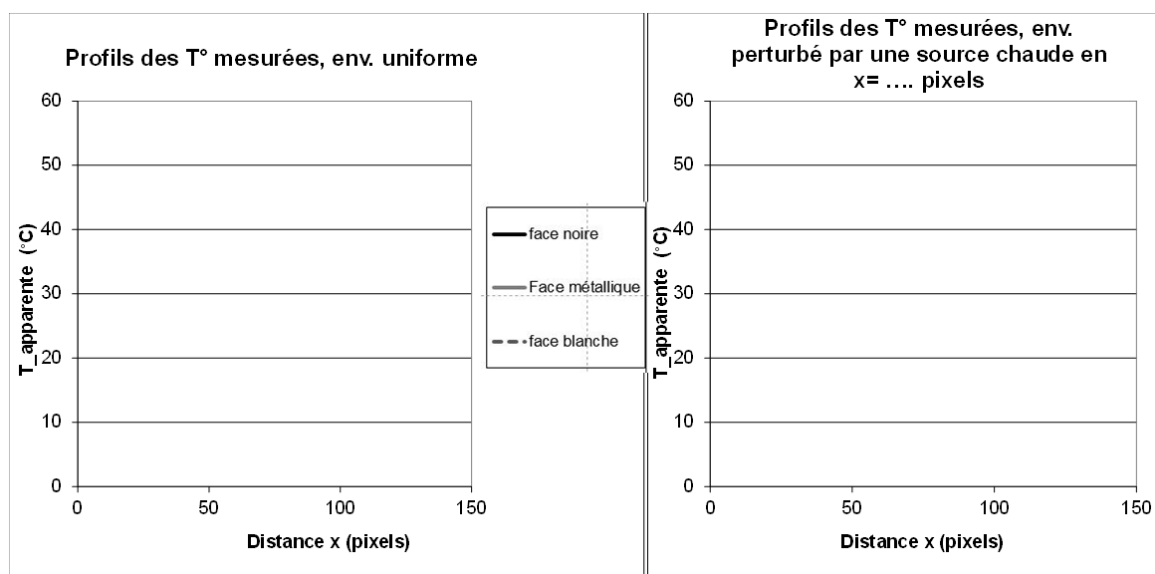


FIGURE 11 – Les deux graphes de températures apparentes attendus (3 profils à gauche, 3 profils à droite). Pour extraire un profil ligne de Researcher vers Excel : une fois la ligne dessinée sur l'image IR (avec la barre d'outil de gauche), 'Menu Edit/Copy Value, colonne de gauche 'Line' et colonne de droite 'String data', bouton 'Copy', ouvrir une feuille Excel vierge et 'Edit/coller' dans une colonne les valeurs copiées.

- Pour les faces noire, blanche et métallique diffuse (non polie) du cube, acquérir une image de sa température apparente corps noir  $T^0$  en environnement uniforme (Figure 10 haut) et en environnement perturbé par la surface noire chaude placée perpendiculairement au cube (Figure 10 bas). Sauver chacune de ces six images pour les inclure dans votre rapport. Sur un même graphique Excel, représenter un profil ligne de  $T^{circ}$  relevé au même endroit sur

chaque surface du cube, dans les deux situations (soit  $3 \times 2 = 6$  courbes au total, sur 2 graphes à la même échelle, 3 courbes à gauche (environnement uniforme) et 3 courbes à droite (environnement perturbé en  $x=0$ , voir la Figure 11).

- Dans les deux environnements, représenter sur un schéma et expliquer les flux recueillis par la caméra.
- En étudiant les profils de  $T^\circ$  de chaque face en environnement uniforme, classer les 3 faces par ordre d'émissivité croissante, en expliquant votre critère de classement.
- Expliquer l'allure des profils de  $T^\circ$  de chaque face en environnement perturbé. Pouvait-on prévoir quelle(s) face(s) allaient être plus perturbées que les autres par la présence de la face noire chaude ? Classer alors les 3 faces par ordre de réflectivité croissante.
- Une image infrarouge d'une surface est-elle une cartographie de sa température ? Est-il possible de remonter à la vraie température  $T$  des faces à partir de leur température apparente  $T^\circ$  dans les deux environnements ?

## 5 Références

### Ouvrages

- "Mesure par thermographie infrarouge", D. Pajani, Add editeur, 1989
- "Thermographie Infrarouge. Image et Mesure", F. Papini et P. Gallet, ed. Masson, 1994
- « La Thermographie infrarouge, Principes Technologies Applications, 4ème Ed. », G. Gaussorgues, 1999

### Revues

- "Thermographie. Principes et mesure", D. Pajani, Techniques de l'ingénieur R2740, 2001
- "Thermographie. Technologie et applications", D. Pajani et L. Audaire, Techniques de l'ingénieur R2741, 2001

### Documents internes

- "Rayonnement thermique", TP 1ème année S6 de Polytech/ME



## 6 ANNEXE

### ThermoVision™ A40M

Caméra infrarouge compacte pour la mesure et la surveillance thermique en procédés industriel



- ◆ L'IMAGE THERMIQUE
- ◆ L'AFFICHAGE DE L'IMAGE
- ◆ LA MESURE
- ◆ LES OPTIQUES ADDITIONNELLES
- ◆ ALIMENTATION
- ◆ L'ENVIRONNEMENT
- ◆ LES CARACTERISTIQUES
- ◆ INTERFACES
- ◆ Tableau de configuration paramétrable par l'utilisateur\*

#### L'IMAGE THERMIQUE

Champ d'observation (HxV)	24° x 18°, (avec une focale de 35 mm)
Distance minimum de focalisation	0,3 m
IFOV	1,3 mrad
Résolution thermique	0,08°C à 30°C
Fréquence image	50 Hz
Focalisation	Focalisation par moteur interne : réglage manuel ou autofocus
Type de détecteur	Matrice à plan focal, microbolomètre non refroidi, 320 x 240 éléments
Réponse spectrale	7,5 - 13 µm

#### L'AFFICHAGE DE L'IMAGE

Sortie video	Composite CCIR/PAL ou RS170 EIA/NTSC
Sortie numérique	FireWire (IEEE-1394) 8/16 bits
	Ethernet (RTP) 8 bits

#### LA MESURE

Gammes de mesure	-40°C à +500°C, en 2 gammes et jusqu'à +1.500°C ou +2.000°C en option
Exactitude de mesure sur corps noir	±2°C ou ±2% de la lecture
Outils de mesure	Spot (jusqu'à 6), zone (4), isotherme, Delta de température, % isométrique
Correction de l'émissivité	Variable de 0,1 à 1
Correction de T° interne	Automatique, avec thermistances internes
Correction d'optique externe	Automatique, basée sur la T° et la transmission de l'optique