

Compte rendu de TP - Caméra Infrarouge

Baptiste Fanget - Pezard Léo - Mécanique Energétique 3A

04/02/2025

1 Préambule

1.1 Introduction

L'imagerie infrarouge est un outil essentiel permettant d'observer la chaleur émise par des objets, bien au-delà de ce que l'œil humain peut percevoir. Grâce à une caméra infrarouge, il est ainsi possible de repérer et étudier les changements de température d'une scène, avec des applications variées allant de l'industrie à la recherche scientifique, en passant par la thermographie des bâtiments.

Ce TP a pour but de nous familiariser avec le fonctionnement de la caméra infrarouge et de comprendre comment elle capte et traduit le rayonnement thermique en images exploitables. À travers différentes expériences, nous observerons l'influence de l'émissivité et de la température sur les images obtenues. En utilisant des sources radiatives comme un corps noir ou des surfaces aux propriétés thermiques variées, nous verrons comment interpréter correctement ces images et ce qu'elles nous apprennent sur les objets observés.

1.2 Matériel utilisé

1.2.1 Station d'imagerie et de mesure infrarouge

La chaîne de visualisation et d'acquisition d'images infrarouges comprend tout d'abord la caméra infrarouge (modèle A40 fabriquée par FLIR) 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).



Figure 1: Photo de la caméra infrarouge utilisée

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).

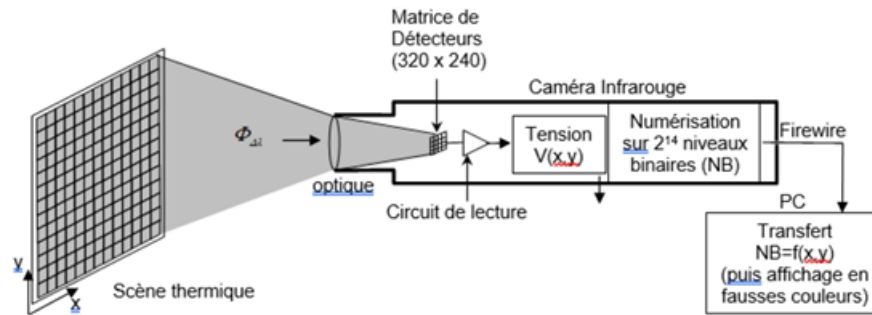


Figure 2: Schéma de la scène thermique vers la matrice de détecteurs puis vers l'image infrarouge

Chaque détecteur de la matrice est sensible dans la gamme $7,5\text{--}13\text{ }\mu\text{m}$. Il faut noter que à température ambiante (environ $20\text{--}25^\circ\text{C}$), la majorité des rayonnements thermiques des objets est émise dans cette plage de $7\text{ à }13\text{ }\mu\text{m}$. Cela permet à la caméra de capter le maximum d'énergie thermique des objets sans être trop influencée par d'autres sources de rayonnement, comme la lumière visible ou l'infrarouge proche.

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 puis numérisées et transmises à l'ordinateur.

1.2.2 Sources radiatives

Corps noir

La source radiative de référence (ou « référence thermorayonnante ») utilisée est un corps noir de laboratoire (Figure 3).

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 degrés, 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 degrés dans un

environnement à 20 degrés est donc un disque (« fort » flux quittant la cavité) se détachant de son environnement.



Figure 3: Corps noir de laboratoire

Cube de Leslie

Ce cube (Voir Figure 4) présente 4 facettes latérales en aluminium chauffées par une ampoule de 100W placée au centre. La température de chaque face peut être supposée uniforme. Les quatre faces présentent un état de surface différent : peinture noire, peinture blanche, aluminium non poli, aluminium poli.

Lors du TP précédent, nous avons pu faire un classement des émissivités de chaque face:

Table 1: Émissivités de chaque face calculées lors du TP précédent.

Face	Émissivité ($\epsilon_{0.4-40\mu m}$)
Noire	0.94
Blanche	0.92
Polie	0.05
Non polie	0.1

Nous avons également pu réaliser un classement des faces en fonction de leur pouvoir réfléchissant, par ordre croissant : Face noire, face blanche, face non polie puis face polie.

La réflexion de rayonnement par la face en aluminium poli est de type spéculaire (rayons concentrés dans 1 seule direction), alors que pour les autres faces, elle pourra être considérée diffuse (rayonnement réparti sur une plus grande surface).

Un pouvoir réfléchissant élevé signifie que le flux de chaleur ne passe pas à travers la surface, il est donc réfléchi par celle-ci, ainsi la chaleur est renvoyée sur la thermopile.



Figure 4: Cube de Leslie

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 5, 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).

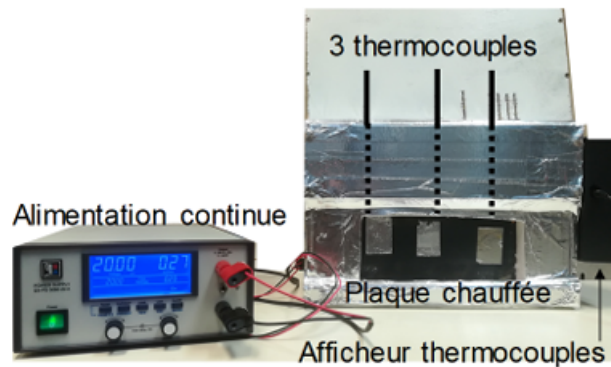


Figure 5: Plaque chauffante à différentes émissivités

1.3 Travail préparatoire

Réalisé sur Amétice.

Notions importantes abordées :

- Le signal électrique de la caméra infrarouge est proportionnel au flux total reçu par le détecteur. Ce flux comprend :

- Le rayonnement émis par la scène thermique (proportionnel à sa température et son émissivité).
- Le rayonnement réfléchi provenant de l'environnement.
- L'expérience d'étalonnage d'une caméra infrarouge consiste à viser un corps noir à température connue et enregistrer la tension délivrée par le détecteur infrarouge de la caméra.

Par exemple, si une caméra infrarouge vise une surface « réelle » (c'est à dire « non-noire ») de température réelle inconnue et placée dans un environnement de température inconnue et indique que sa température apparente corps noir de 57°C, cela signifie que cette surface envoie un flux infrarouge vers la caméra qui correspond à celui qu'émettrait le corps noir à 57°C

- La caméra infrarouge mesure une température apparente corps noir, mais la température vraie de la surface dépend de son émissivité et du rayonnement réfléchi par l'environnement.

2 Expériences

2.1 Observation d'un corps noir et de surfaces non noires en environnement uniforme

2.1.1 Introduction

L'étalonnage de la caméra infrarouge consiste à enregistrer la réponse (en V) de la caméra face à un corps noir de laboratoire à température variable T^0 . La tension mesurée $\Delta V_0(T_0)$ est liée à la température T^0 par la formule suivante :

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

Avec :

- $R(\lambda)$ la sensibilité spectrale relative du détecteur dans la bande $\Delta\lambda$.
- 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.

Lors de la mesure sur un corps réel, l'émissivité $\epsilon(\lambda)$ influence la tension mesurée ΔV_{mes} , qui peut être exprimée par :

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

Soit :

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

Avec :

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

La température apparente du corps réel, T_{mes}^0 , est calculée en fonction de ΔV_{mes} , offrant ainsi une estimation de la température du matériau observé.

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

Avec :

- T_{mes}^0 la température apparente corps noir
- $\epsilon_{\Delta\lambda}$ l'émissivité spectrale de la surface dans la bande spectrale de la caméra.
- T la vraie température
- T_a la température de l'environnement

Donc, plus l'émissivité de la surface est grande (proche de 1), plus la température mesurée sera proche de la température vraie. Inversement, si l'émissivité est faible (proche de 0), la température mesurée sera proche de la température ambiante.

2.1.2 Travail à réaliser

Pour commencer, un étalonnage de la caméra est nécessaire, pour cela il faut utiliser un corps noir à température connue (affichage sur un régulateur).

Cet étalonnage est réalisé en plaçant le corps noir devant la caméra (Voir Figure 6) et en vérifiant que la température mesurée par la caméra correspond bien à la température mesurée sur le régulateur.

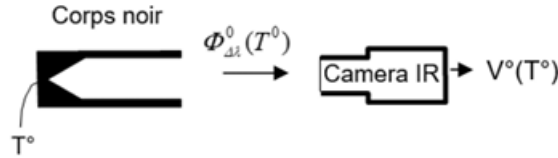


Figure 6: Schéma du montage pour l'étalonnage devant le corps noir de laboratoire

Cette expérience permet d'obtenir la température du corps noir grâce à T_{mes} ainsi que la vraie température donnée par les thermocouples. La température ambiante T_a et l'équation (5) sont également nécessaires pour déterminer l'émissivité du corps noir.

$$\epsilon = \frac{T_{mes}^4 - T_a^4}{T^4 - T_a^4} = \frac{352.05^4 - 294.15^4}{353.21^4 - 294.15^4} \approx 0.97$$

Cette émissivité est proche de 1 (émissivité d'un corps noir), l'écart relatif est de $\frac{\epsilon_{mes}-1}{1} \approx 3\%$

Il est intéressant de mettre différents objets devant la caméra pour observer les variations de température au sein des objets et également de mettre en évidence leurs différences d'émissivité et de transmittivité.

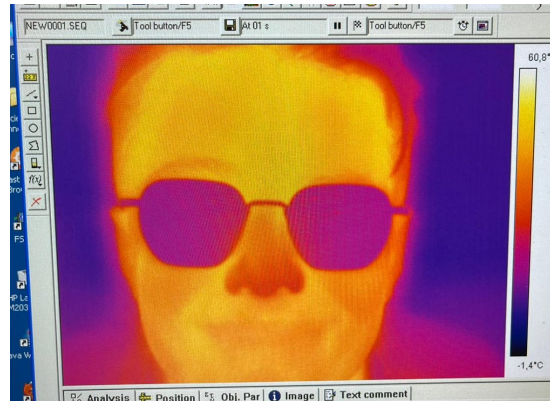


Figure 7: Photo d'un camarade avec lunettes

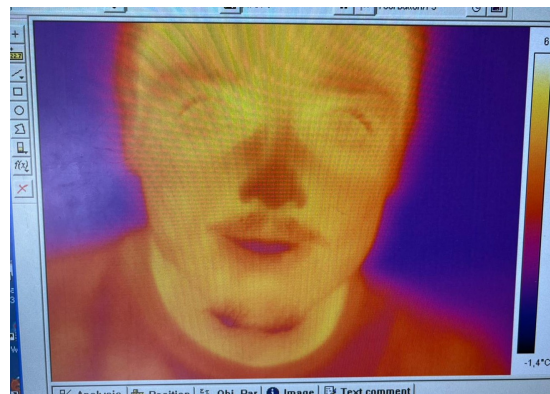


Figure 8: Photo de Baptiste

TODO : photos au dessus

Maintenant que la caméra est étalonnée, il est possible de faire la mesure sur des corps réels comme indiqué sur la Figure 10. Une plaque chauffante (Voir Figure 5) sur laquelle sont placés différents matériaux, faisant donc varier les émissivités des parties de la plaque.

Pour calculer les émissivités des différentes surfaces on peut utiliser la formule (5).



Figure 9: Photo de Léo

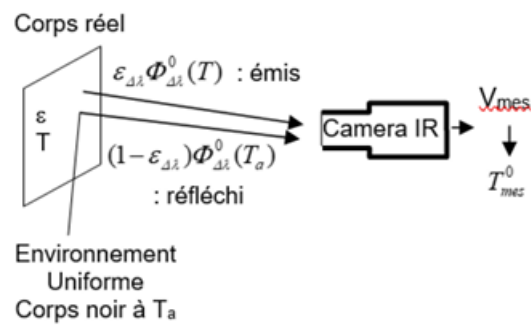


Figure 10: Schéma du montage pour la mesure sur un corps réel (plaque chauffante)

Table 2: Tableau des mesures et des émissivités calculées

Surface observée	Température T du thermocouple associé (°C)	Température T_{mes} relevée par la caméra (°C)	Emissivité ϵ
Aluminium	38,89	24,9	0,17
Aluminium + vernis	38,92	37,1	0,87
Aluminium + scotch	38,93	33,7	0,68
Noire	38,92	38,5	0,97

Pour résumer :

Les surfaces qui sont peintes en noir ou qui ont des propriétés similaires à celles d'un corps noir auront une émissivité proche de 1. Cela signifie qu'elles émettent presque tout le flux qu'elles reçoivent.

Les surfaces métalliques ou brillantes, en revanche, auront une émissivité plus faible, ce qui signifie qu'elles reflètent une grande partie du flux incident et émettent moins de chaleur, on remarque ici que le vernis est plus émissif que l'adhésif.

Remarque :

Lorsque nous passons devant le dispositif (et derrière la caméra), la plaque réfléchissante renvoie le flux de chaleur de notre corps sur la caméra et une différence de température mesurée est remarquable. (Voir Figures 11 et 12)

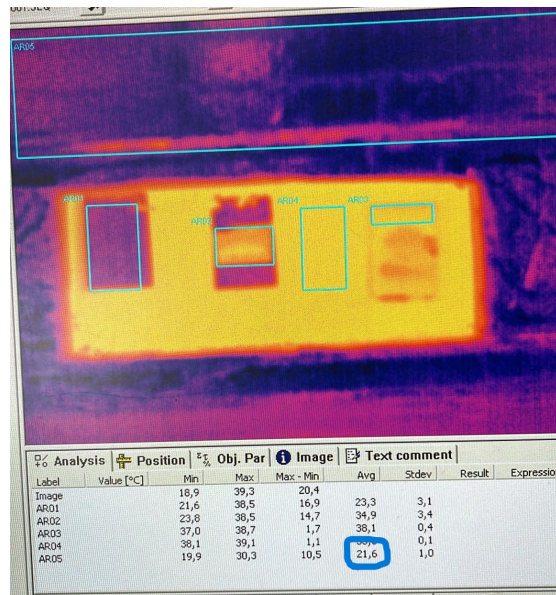


Figure 11: Vue de la caméra sans reflet de chaleur de notre corps

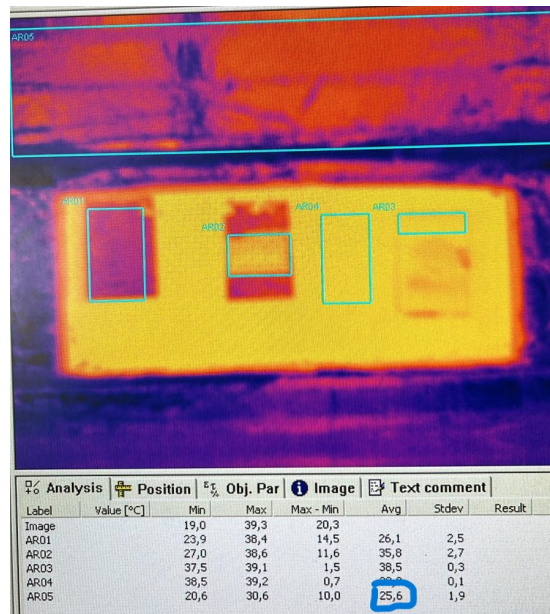


Figure 12: Vue de la caméra avec reflet de chaleur de notre corps

Nous remarquons une augmentation de la température moyenne mesurée sur la zone de reflet (voir encadrés sur les figures).

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

On chauffe un premier cube à 30°C , où l'on va mesurer les températures des faces noires, métalliques et blanches. Puis dans un deuxième temps on chauffe un deuxième cube à 130°C , placé (perpendiculairement) au premier pour créer une zone perturbée devant le cube à 30°C . (Voir figures 13 et 14).

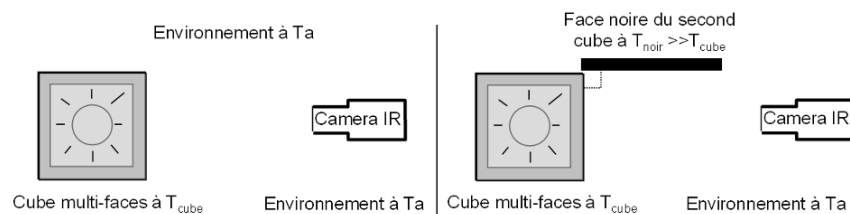


Figure 13: Surfaces de différentes émissivités (3 faces du cube multifaces) observées dans un environnement uniforme (à gauche), puis perturbé par une source de rayonnement chaude et émissive (à droite), qui est la face noire du second cube multifaces

TODO: Excel courbes

Courbe des profils de température dans un environnement uniforme (à gauche),

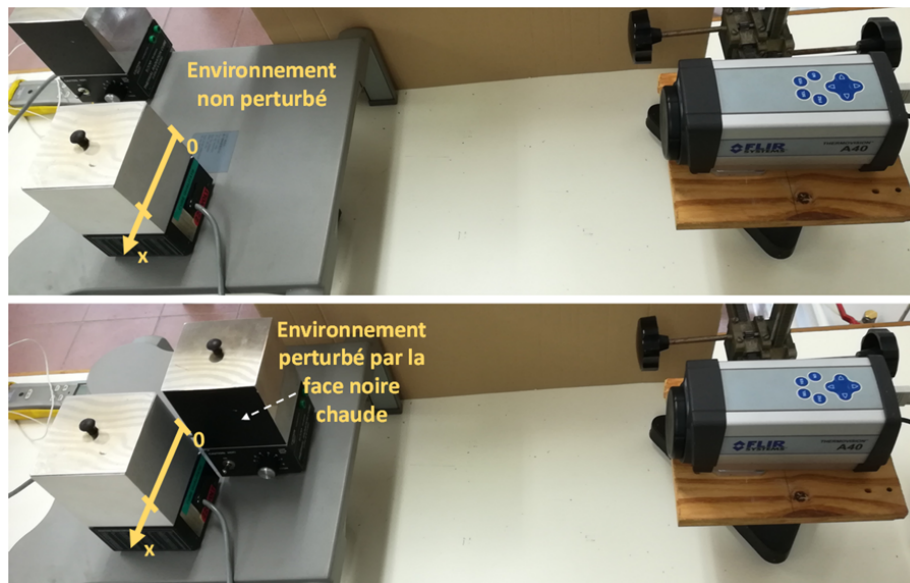


Figure 14: Observation du cube multiface dans un environnement uniforme (en haut) et dans un environnement perturbé (en bas)

dans un environnement perturbé (à droite)

D'après le profil des températures de chaque face en environnement uniforme (Figure ??), on peut établir un classement d'émissivité des faces. Par ordre croissant cela donne : face non polie, face noire puis face blanche. La température est le critère de classement, on remarque que la température est plus élevée pour la face blanche, cela s'explique par la plage de longueur d'onde de la caméra (entre 7 et 13 μm). Dans cette zone l'émissivité de la face blanche est plus élevée que celle de la face noire.

Il est possible de remarquer que les profils de température sont différents dans la deuxième situation. En effet, la température observée le long de la face du cube décroît en fonction de sa distance au cube chaud.

Pour la face non polie, la pente de décroissance est plus importante que pour les pentes des faces blanches et noires, c'est-à-dire que la température de la surface décroît plus rapidement en fonction de la distance. C'est à dire que plus nous prenons des mesures de températures loin du cube chaud, moins les températures mesurées sont élevées.

Ces observations pouvaient se prévoir car la face non polie est très peu émissive mais plutôt réfléchive, contrairement aux faces blanches et noires.

On peut donc faire un classement de chaque face en fonction de leur réflectivité. Par ordre croissant cela donne : Face noire, face blanche puis face non polie.

TODO : Faire schéma des flux recueillis par la caméra dans les deux environnement + légènder photos

TODO légènder les images au dessus

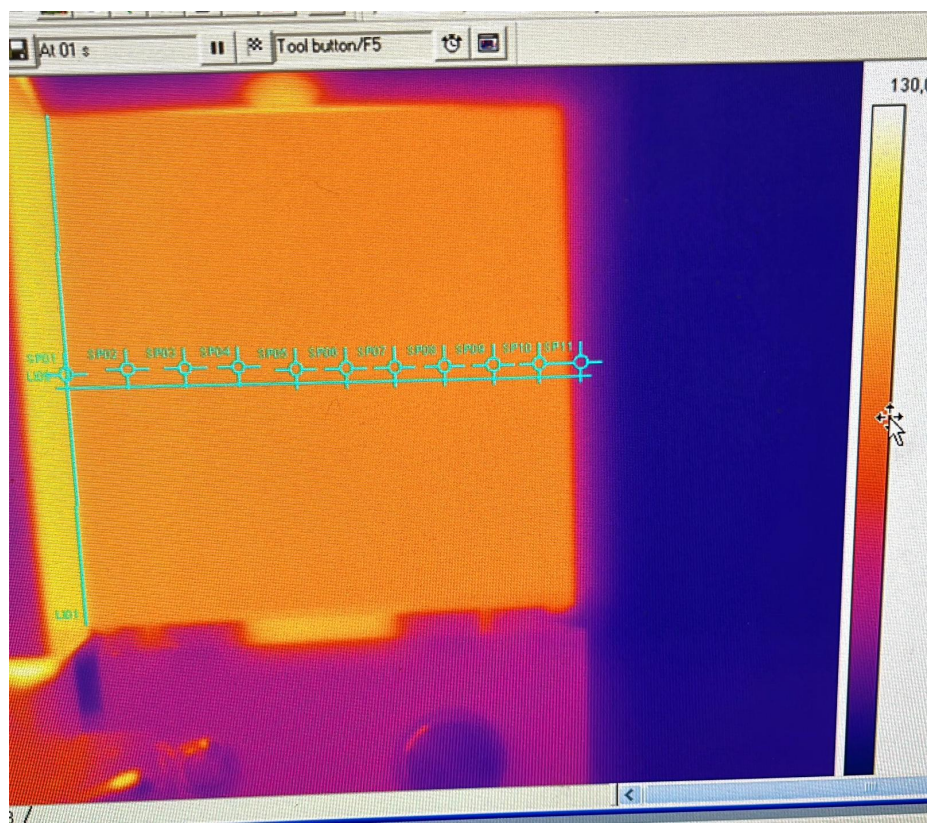


Figure 15: Environnement uniforme - La température est quasi constante dans la totalité de la surface

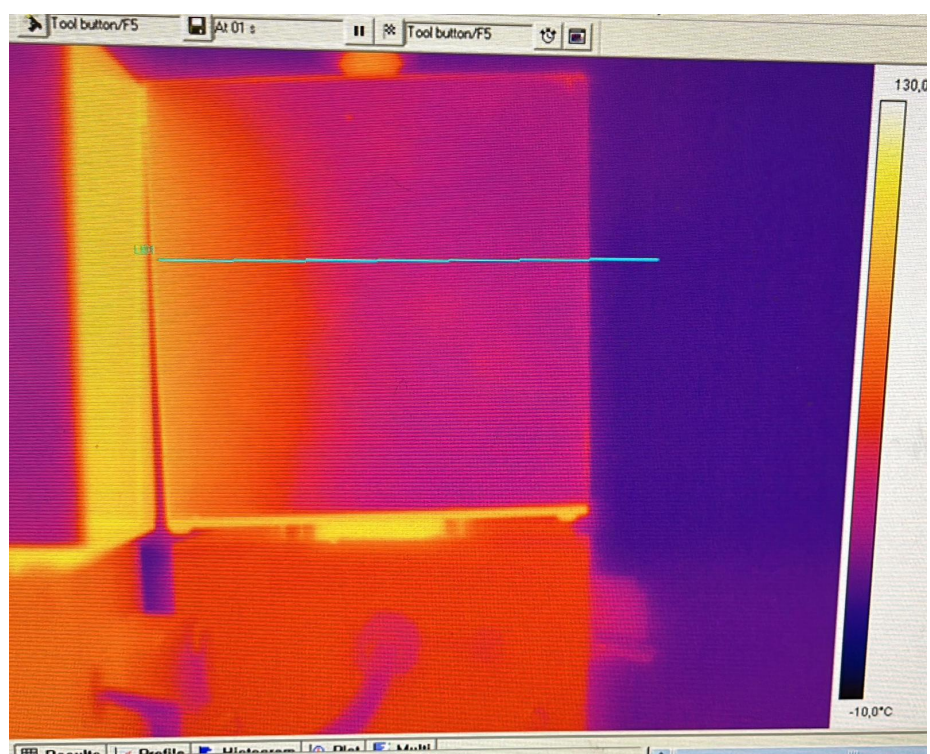


Figure 16: Environnement perturbé - La température varie par rapport à la distance de la source chaude

Nous pouvons ajouter que une image infrarouge ne donne pas directement une cartographie exacte de la température, mais plutôt une mesure du rayonnement thermique, qu'il faut corriger en fonction de l'émissivité pour obtenir la température réelle.

La caméra infrarouge mesure donc une température apparente corps noir, mais la température vraie de la surface dépend de son émissivité et du rayonnement réfléchi par l'environnement. Il est ainsi possible de retrouver la vraie température en connaissant la température ambiante, la température mesurée et l'émissivité de la surface.

TODO : conclusion