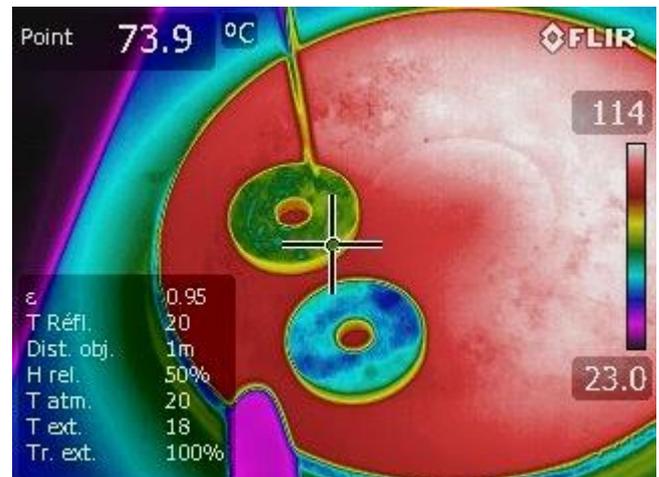


## IMAGERIE ET PYROMETRIE INFRAROUGE



**Etudiants :**

<b>Amin BARRADOUANE</b>	<b>Lucile MARTIN</b>
<b>Camille MOREAU</b>	<b>Alexis THEVENIN</b>
<b>Yiheng WU</b>	<b>Xiuqi ZHOU</b>

**Enseignant-responsable du projet :**

**Jérôme Yon**



## REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier vivement Monsieur YON pour son enseignement dans le cadre du cours de projet P6, ainsi que l'aide apportée dans la réalisation de notre projet, d'autant plus en cette période compliquée. Son aide et sa disponibilité nous ont été profitables, et nous ont permis de mener à bien ce projet.

De plus, nous remercions Monsieur WILLIAMS et Madame RADE pour leur encadrement technique, notamment par le prêt de la caméra thermique et du matériel lors de la réalisation de l'expérience.

Date de remise du rapport : **12/06/2021**

Référence du projet : **STPI/P6/2021 – 28**

Intitulé du projet : **IMAGERIE ET PYROMETRIE INFRAROUGE**

Type de projet : **Bibliographie, état de l'art, simulation, expérimental.**

Objectifs du projet (10 lignes maxi) :

**L'objectif de ce projet a été la modélisation de champs de températures montrant le réchauffement d'une pièce. Cela a été réalisé non pas avec de « fausses » couleurs comme une caméra thermique, mais avec une adaptation de la vision humaine adaptée à l'infrarouge.**

Mots-clefs du projet (4 maxi) : **CAMERA THERMIQUE, MODELISATION, CORPS NOIR**

Si existant, n° cahier de laboratoire associé : **aucun**

## TABLE DES MATIERES

1.	Introduction .....	6
2.	Méthodologie / Organisation du travail .....	7
3.	Travail réalisé et résultats .....	7
3.1.	La vision des Hommes	
3.1.1.	La lumière visible.....	8
3.1.2.	Le fonctionnement de l'œil humain (cônes, bâtonnets).....	8
3.1.3.	La perception des couleurs.....	9
3.2.	La caméra thermique : un outil indispensable ?.....	9
3.2.1.	Le corps noir et son émissivité : un concept au centre de notre projet	9
3.2.2.	Le rôle et le fonctionnement d'une caméra thermique.....	11
3.2.3.	Expérience réalisée.....	12
3.3.	Simulation du champ de températures et de sa vision adaptée dans l'infrarouge.....	14
3.3.1.	Simulation d'une vision adaptée à l'infrarouge.....	15
3.3.2.	Application de cette vision à la pièce métallique de l'expérience.....	16
3.3.3.	Résolution numérique de l'équation de la chaleur en coordonnées cylindriques axisymétriques de notre pièce métallique.....	17
4.	Conclusions et perspectives.....	20
5.	Bibliographie .....	21
6.	Annexes .....	22
6.1.	Annexe 1 : Programme vue infrarouge .....	22
6.2.	Annexe 2 : Résolution de l'équation de la chaleur en coordonnées axisymétriques .....	24
6.3.	Annexe 3 : Programme simulation du champ de températures.....	27
6.4.	Annexe 4 : Programme contrsate augmenté .....	28

## 1. INTRODUCTION

Le sujet général sur lequel nous avons travaillé est très vaste : « Imagerie et pyrométrie infrarouge ».

L'objectif de notre projet a été la modélisation d'un champ de températures correspondant au réchauffement d'une pièce métallique. Cependant, nous avons souhaité le modéliser, non pas avec de « fausses » couleurs (comme une caméra thermique) ; mais de la même façon qu'un œil humain l'interpréterait si nous étions capables de voir dans le domaine infrarouge. Nous avons donc réalisé une adaptation de la vision humaine au domaine infrarouge (IR).

Par ce projet, nous cherchons à comprendre en quoi consiste l'imagerie et la pyrométrie infrarouge. Par le biais de l'expérience réalisée, les supports de cours de P8 (partie transferts thermiques) et nos recherches documentaires, nous avons, d'une part, souhaité appréhender la notion de perception visuelle ; et, d'autre part, réfléchi et apporté une réponse à la question suivante :

Que verraient nos yeux humains si notre spectre de vision s'étendait à l'IR, et que l'on regardait le réchauffement d'une pièce ?

## 2. METHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

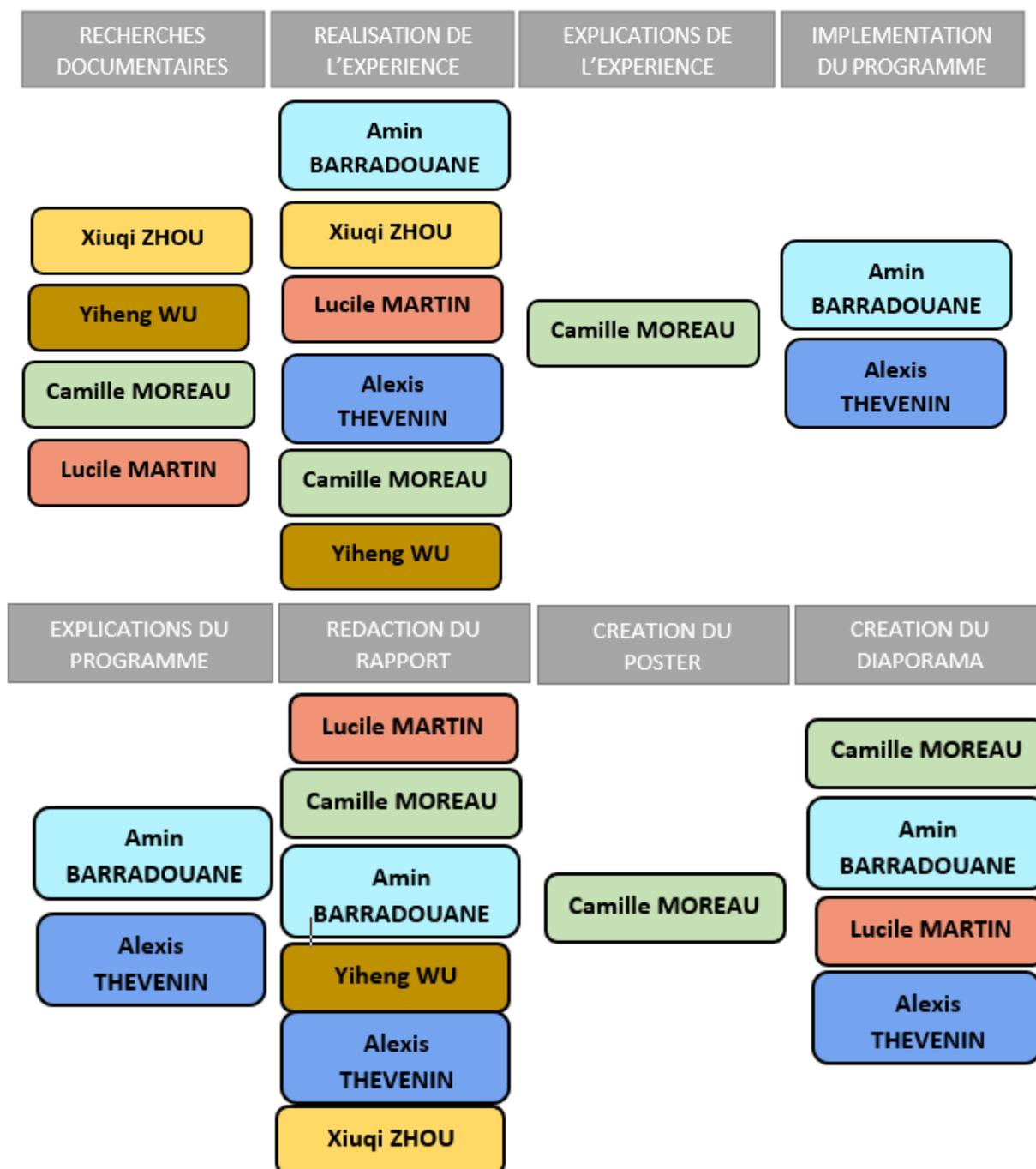
Toutes ces étapes ayant nécessité de nombreuses heures de recherches, nous avons réparti le travail.

Ainsi, les recherches documentaires ont été, en majeure partie, réalisées par Xiuqi ZHOU, Yiheng WU, Camille MOREAU et Lucile MARTIN.

La partie expérience a été réalisée par l'intégralité du groupe. Les explications de celle-ci ont été rédigées par Camille MOREAU.

L'implémentation du programme, quant à elle, a été prise en charge par Amin BARRADOUANE et Alexis THEVENIN.

Le rapport a été, dans sa majeure partie, rédigé par Lucile MARTIN. Le poster a été pris en charge par Camille Moreau et le diaporama a été fait par Camille MOREAU, Amin BARRADOUANE, Alexis THEVENIN et Lucile MARTIN.



### 3. TRAVAIL REALISE ET RESULTATS

#### 3.1. La vision des Hommes

##### 3.1.1. La lumière visible

On appelle « lumière visible » la partie du spectre électromagnétique visible par l'œil humain, c'est-à-dire les longueurs d'ondes comprises entre 380 nm et 780 nm. Communément, on le considère composé de sept couleurs, à savoir : le rouge, l'orange, le jaune, le vert, le bleu, l'indigo et le violet. Les longueurs d'ondes inférieures à 380 nm appartiennent au domaine de l'ultraviolet, tandis que celles supérieures à 780 nm appartiennent à l'infrarouge.

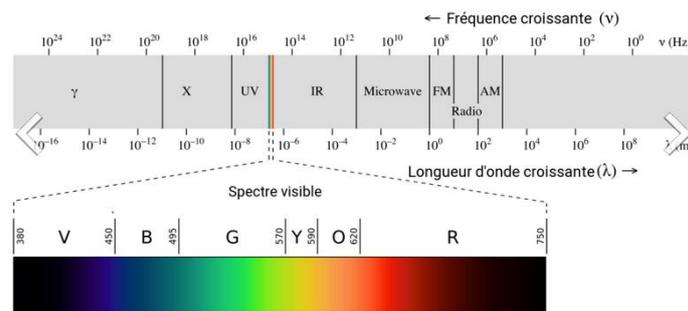


fig 1 : Le spectre visible [1]

A la suite des travaux de nombreux scientifiques tels que Einstein ou encore Broglie qui viennent contredire le débat entre les théories concurrentes de Newton, qui considérait la lumière comme un flot de corpuscules et celle de Huygens, qui considérait lui que la lumière était composée d'ondes, la dualité onde-corpuscule est introduite. De ce fait, cette dualité indique que la lumière peut être représentée soit par des photons ou par des ondes électromagnétiques. Ainsi, certains phénomènes optiques, comme le rayonnement du corps noir et la loi de Planck, s'expliquent par la théorie ondulatoire, la lumière étant une onde électromagnétique. Pour d'autres effets comme celui de Compton, il faut supposer que la lumière est composée de corpuscules d'énergie nommés, photons [2].

#### 3.1.2. Le fonctionnement de l'œil humain

##### 3.1.2.1 Le rôle des bâtonnets

Les bâtonnets sont des cellules nerveuses réceptrices spécialisées, contenant des substances photosensibles. Avec pour dimensions 0.06 mm de long et 0.25mm d'épaisseur pour une quantité s'élevant à 120 millions par œil, ils sont très efficaces lorsque la lumière est faible. Ils ne 'voient' que le noir et blanc, mais perçoivent les variations d'intensité de la lumière.

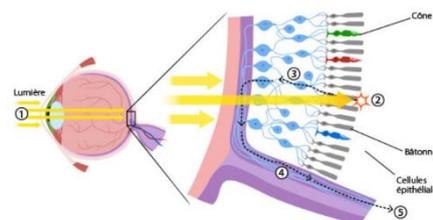
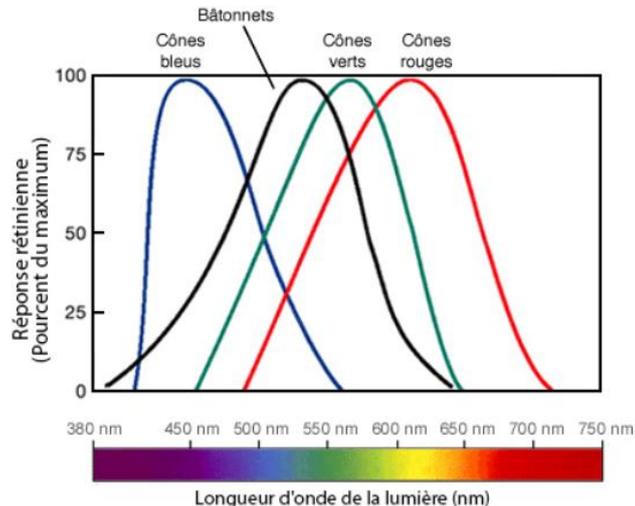


fig 2 : Schéma du fonctionnement des cônes et des bâtonnets [3]

### 3.1.2.2 Le rôle des cônes

De même, les cônes sont des cellules nerveuses réceptrices spécialisées contenant des substances photosensibles. Chaque être humain en possède en moyenne 7 millions par œil. Ils ne sont efficaces que lorsque la luminosité est élevée, et ils sont répartis en trois catégories, qui permettent de reconstituer toutes les couleurs que l'on 'connaît' : les cônes rouges, les cônes verts et les cônes bleus.



**fig 3 : Réponse rétinienne liée aux cônes et bâtonnets en fonction de la longueur d'onde [4]**

Dans notre expérience, nous avons souhaité modéliser une autre vision, au sens où l'on s'est demandé ce que l'on verrait si les cônes et les bâtonnets étaient sensibles à d'autres longueurs d'ondes.

### 3.1.3. **La perception des couleurs**

Comme nous l'avons vu précédemment, les cônes et les bâtonnets sont les cellules responsables de la perception des couleurs chez l'Homme. Les cônes, sensibles au rouge, au vert et au bleu, envoient des signaux plus ou moins intenses, ce qui permet ainsi de reconstituer toutes les couleurs du spectre visible. A l'exception des corps incandescents, l'œil perçoit la réflexion de la lumière sur un objet et non l'émission propre de l'objet due à sa chaleur.

## 3.2. **La caméra thermique : un outil indispensable ?**

### 3.2.1. **Le corps noir et son émissivité : un concept au centre de notre sujet**

#### 3.2.1.1. Définition

On appelle corps noir, un corps idéal qui absorbe toute l'énergie électromagnétique qu'il reçoit, sans en réfléchir ni en transmettre. En revanche, ceci n'est pas réaliste, car un tel "corps noir" verrait sa température augmenter indéfiniment.

Or, un corps noir, à température constante, réémet l'énergie qu'il a absorbée sous forme de rayonnements électromagnétiques. Par ailleurs, son spectre d'émission dépend de sa température. Ce corps noir n'étant pas réaliste, il est nécessaire de déterminer l'émissivité, qui permet de faire la différence entre le corps réel et le corps noir.

Si la température du corps noir est connue, on peut connaître son spectre d'émission (loi de Planck), on va aussi pouvoir connaître la longueur d'onde de luminance maximale (loi de Wien). Un corps noir à température ambiante paraîtra noir car la plus grande partie de l'énergie émise est située dans le domaine de l'infrarouge, qui ne peut être perçue par l'œil humain. L'œil humain étant incapable de percevoir la couleur à de faibles intensités de lumière, un corps noir observé dans l'obscurité à la température la plus basse sera faiblement visible, et paraîtra subjectivement gris, même si son spectre physique atteint son niveau maximum dans les infrarouges. Lorsqu'il devient un peu plus chaud, il prend une couleur rouge terne. Au fur et à mesure que sa température augmente, sa longueur d'onde diminue pour atteindre une couleur bleue-blanche éblouissante.

### 3.2.1.2. Loi de Planck : expression de la luminance du corps noir

La loi de Planck permet d'exprimer la distribution de la luminance énergétique monochromatique du rayonnement thermique du corps noir en fonction de la température.

La luminance peut être définie comme un flux énergétique par unité de surface, par unité d'angle solide et par unité de longueur d'onde. En unités S.I, elle s'exprime en  $W \cdot m^{-2} \cdot m^{-1} \cdot sr^{-1}$ .

$$L_{\lambda} = \frac{2hc_{\lambda}}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc_{\lambda}}{k\lambda T}\right) - 1}$$

- $\lambda$  la longueur d'onde en m
- $h = 6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$  J s est la constante de Planck
- $c = 299\ 792\ 458$  m s<sup>-1</sup> la vitesse de la lumière dans le vide
- $k = 1,380\ 649 \times 10^{-23}$  J K<sup>-1</sup> est la constante de Boltzmann
- $T$  est la température en K

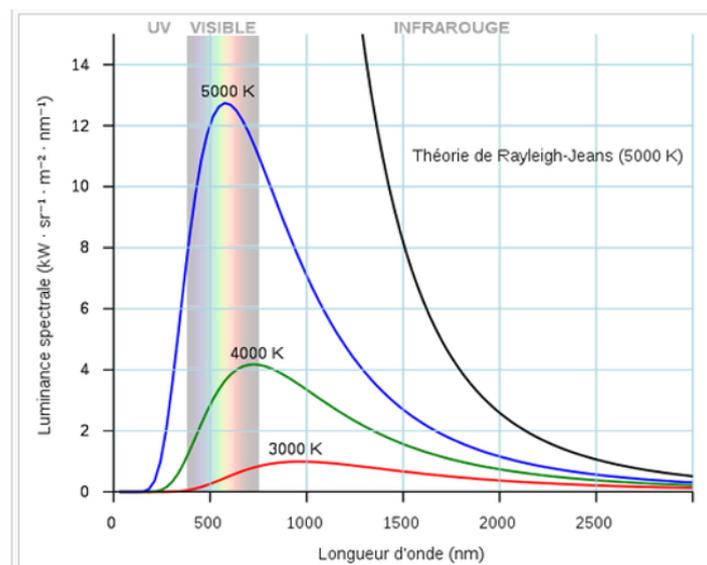


fig 4 : La loi de Planck appliquée à différentes températures [5]

### 3.2.1.3. Loi de Wien : expression de la longueur d'onde maximale

La loi de Wien a été déterminée de façon empirique par le physicien du même nom. Elle relie la longueur d'onde maximale associée au pic d'émission lumineuse du corps noir et la température  $T$ , considérée absolue.

$$\lambda_{max} T = 2.898 \cdot 10^{-3} m \cdot K$$

### 3.2.1.4 Emissivité

Un pyromètre infrarouge mesure le flux d'énergie radiative ou thermique émise par un objet pour la convertir en température en suivant les équations de Planck. Cependant, la quantité d'énergie émise et reçue par ce dernier est très dépendante de l'émissivité du matériau. L'émissivité se définit comme l'aptitude d'un matériau à émettre et à absorber un rayonnement. Un « corps noir » désigne un objet parfait, il réémet la totalité de son énergie à toutes les longueurs d'ondes ainsi, son spectre ne dépend ainsi que de sa température. Les objets réels réémettent un rayonnement toujours inférieur à celui du corps noir à la même température. Le facteur d'émissivité  $\varepsilon$  représente donc ce rapport entre l'énergie radiative ou flux  $\Phi_r$  émis par l'objet sur l'énergie émise par le corps noir  $\Phi_b$  à la même température, selon l'expression suivante :

$$\varepsilon = \frac{\phi R}{\phi S}$$

L'émissivité est donc sans unité et comprise entre 0 et 1, où on comprend que 1 correspond à un corps noir. De plus, elle dépend de la longueur d'onde et de la direction de mesure du rayonnement. Si elle est mesurée pour une longueur d'onde, on la qualifie de « spectrale » et si elle est mesurée pour une direction d'émission, on parle alors de « directionnelle ». Des facteurs influent sur l'émissivité ; la nature du matériau, notamment son état de surface (rugueux, poreux...) et sa température. De plus, les radiations environnantes se réfléchissent sur l'objet et dépendent ainsi de la nature et l'état de surface. Enfin, rappelons que les règles fondamentales de l'optique dans le spectre visible s'appliquent également dans le domaine de l'infrarouge. De ce fait, pour des objets transparents comme le verre ou le plastique, les radiations provenant du dessous et des cotés sont également partiellement détectées par le pyromètre, ce dernier prend alors en compte ces radiations parasites lors de sa mesure.

## 3.2.2. ***Le rôle et le fonctionnement d'une caméra thermique***

### 3.2.2.1. Qu'est-ce qu'une caméra thermique ?

Une caméra infrarouge est un appareil sans contact qui détecte l'énergie infrarouge (chaleur) et la convertit en un signal électronique, lequel est ensuite traité pour produire une image ou une vidéo thermique, sur laquelle vous pouvez effectuer des calculs de température. La chaleur captée par une caméra infrarouge peut être quantifiée, ou mesurée, de façon très précise, ce qui vous permet de contrôler les performances thermiques.

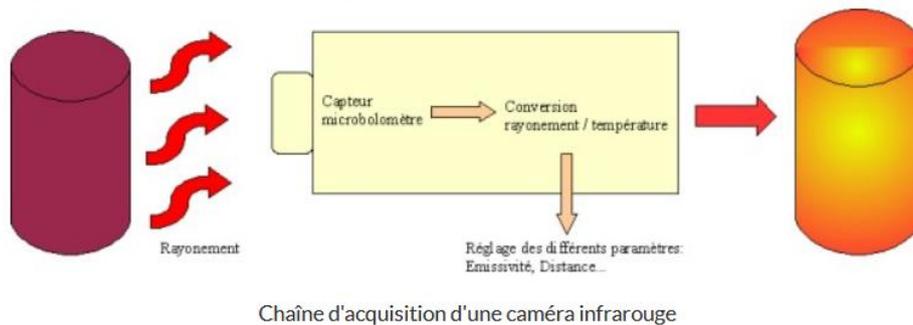
### 3.2.2.2. Le fonctionnement d'une caméra thermique

Une caméra thermique enregistre différents rayonnements infrarouges émis par les corps. Ces derniers varient en fonction de leur température. Une caméra thermique reproduit la chaleur emmagasinée par un corps, ou montre le flux thermique d'une paroi en raison d'un foyer se trouvant à l'arrière. Ainsi, les vitres, tout comme certaines parties métalliques polies, reflètent l'image thermique en agissant comme un miroir. C'est cette image vue par un quelconque observateur qui peut l'induire en erreur. Bien que la longueur d'onde du rayonnement infrarouge dépende de la température, les caméras thermiques ont en général un seul canal (comme une caméra qui filme en "noir et blanc"). Ces dernières ne font que produire une représentation imagée de l'intensité du rayonnement, ce qui permet, par ailleurs, d'avoir une mesure précise de la température de la source étudiée. Une caméra thermique renvoie une image colorée. Il faut avoir à l'esprit que ces couleurs ne sont que des représentations, des « fausses couleurs » obtenues via l'association d'une couleur à une valeur d'intensité. Il est ainsi plus simple, pour les utilisateurs, de « lire » la température, cette dernière étant automatiquement associée à une couleur. Il existe principalement deux types de caméras thermiques :

- Les caméras avec un capteur infrarouge non refroidi. Le capteur fonctionne par la mesure de la variation d'une grandeur (courant, tension) en fonction de la température en chaque point du capteur. Cette température varie en fonction de la quantité de rayonnement infrarouge reçue. Comme ce type de caméra n'a pas besoin d'enceinte cryogénique, il est meilleur marché que l'autre type, mais souffre de performances inférieures.

- Les caméras avec un capteur infrarouge refroidi. Ce type de caméra utilise un conteneur refroidi par des techniques de cryogénie, le capteur étant enfermé dans une enceinte sous vide ou dans un vase Dewar. Le capteur utilisé est un capteur photographique mais grâce à l'utilisation de matériaux différents de ceux des appareils photographiques, il permet l'acquisition dans le domaine de l'infrarouge. Sans système de refroidissement, le capteur serait ébloui à cause de sa propre émission infrarouge.[7]

La caméra infrarouge fonctionne de la façon suivante : elle capte les rayonnements d'un objet avec un capteur et le transforme en température.



**fig 5 : Chaîne d'acquisition d'une caméra infrarouge**

### 3.2.3. *Expérience réalisée*

#### Objectifs de l'expérience :

Analyse par la caméra thermique de deux objets chauffés, dont l'un se rapproche d'un 'corps noir', pièce que nous avons peinte en noir.

Observer les variations thermiques d'une pièce en métal lorsqu'on la met en contact avec une plaque chauffante.

#### Matériel utilisé pour celles-ci :

- Une caméra thermique FLIR-T62101, gracieusement prêtée par le département Energétique et Propulsion de l'INSA.
- Une plaque électrique
- Un thermocouple de type K
- Deux pièces métalliques circulaires identiques, de diamètre intérieur de 11mm et de diamètre extérieur 39mm et d'épaisseur 4mm d'un alliage inconnu ; l'une laissée « naturelle » et l'autre peinte en noir.

Nous avons, durant nos cours, réalisé une expérience qui met en évidence le fonctionnement d'une caméra IR. Dans un premier temps nous nous sommes munis de deux pièces en métal, de forme et de surface totalement identiques. Malheureusement, la composition de l'alliage de notre métal nous est inconnue. Nous avons peint l'une des pièces en noir, de manière à simuler approximativement un corps noir. (*cf. photo ci-dessous*). Nous avons chauffé ces deux pièces en métal et observé pendant la chauffe l'évolution de leurs températures avec un thermocouple et une caméra thermique en relevant en fonction du temps les températures. On peut distinguer en haut de la photographie notre "corps noir" et en dessous, le corps original, non idéal.

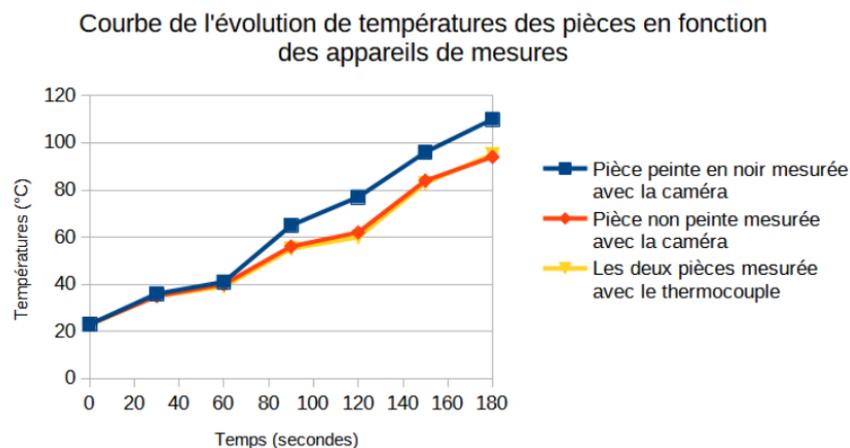


**fig 6 : Photo des 2 pièces métalliques au cours de l'expérience sur la plaque chauffante**

Les 2 pièces ont été placées sur une plaque à 107°C. Nous avons pu relever leurs températures respectives, toutes les 30 secondes, à l'aide d'un thermocouple de type K et d'une caméra infrarouge de manière à comparer l'évolution de température entre les deux pièces et entre les mesures des deux outils. Nous avons utilisé un thermocouple de type K puisqu'il s'agit d'un thermocouple "polyvalent" avec une grande plage de température, et il est très adapté pour les températures courantes soit entre 0 et 1200°C. Ce qui correspondait parfaitement à nos besoins pour réaliser cette expérience.

### Résultats expérimentaux

Les résultats expérimentaux obtenus sont les suivants :



Avant de regarder et d'analyser les résultats que nous avons obtenus au cours de notre expérience, il nous semble relativement important de signaler que la plaque chauffe de manière irrégulière. C'est à dire que pour se maintenir à une gamme de température, elle chauffe, puis s'arrête et dès qu'elle passe en fonction d'une certaine température, chauffe de nouveau. Ce principe peut être légèrement gênant pour notre expérience puisque les pièces ne sont donc pas soumises à un chauffage permanent et continu mais à des "à-coups" de chauffage qui peuvent avoir un léger impact sur les températures relevées, la température n'est pas constante dans le temps.

### Incertitude

Toutes les mesures comportent une incertitude, et les mesures de température par imagerie thermique ne font malheureusement pas exception. Mais l'inexactitude est quantifiable. Il semble donc important de prendre en compte les incertitudes :

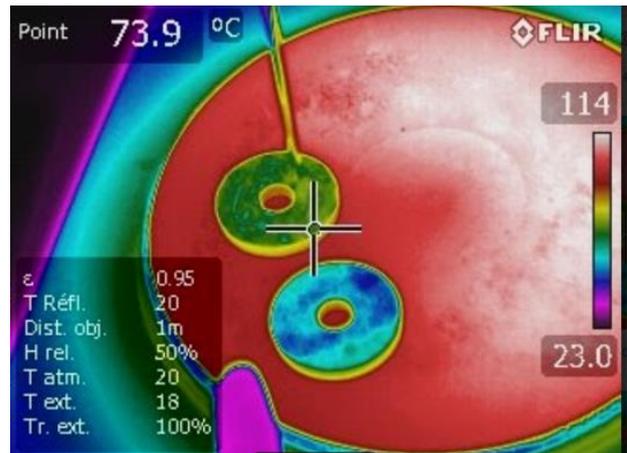
- incertitudes de mesure de la caméra thermique : +/- 2% par rapport à la température réelle (l'erreur en degrés est donc plus importante lorsque la température est plus élevée)
- incertitudes du thermocouple : 1°C

D'autres facteurs agissent également sur le calcul de la température avec la caméra tels que la distance objet - caméra, l'humidité relative de l'atmosphère, la température de l'environnement. Il est possible que ces facteurs aient faussé légèrement les données.

Bien évidemment, la lecture du chronomètre et des températures étant manuelle, des erreurs de précisions ont pu augmenter également les incertitudes des valeurs prises ci-dessus.

Intéressons-nous désormais à l'objet de notre étude : Durant notre expérience qu'a pu observer la caméra thermique ?

Voici les images que nous avons obtenues avec la caméra thermique.



**fig 7 : Image obtenue avec la caméra thermique lors de l'expérience**

En vert/jaune, en haut, le corps noir. En bas en bleu, le corps non noir

### Analyse des résultats :

Bien que les deux pièces aient été chauffées simultanément à même température, on peut constater une différence de couleur notable entre la pièce peinte en noir et l'autre non peinte par la caméra thermique. Cette différence de couleur indique une différence de température, que l'on retrouve également dans les relevés de valeur dans le tableau précédent. La caméra thermique a relevé le corps noir plus chaud que le corps réel. Pourtant, le thermocouple a, lui, obtenu exactement les mêmes températures pour les deux corps tout au long de l'expérience. Comment pouvons-nous expliquer ce phénomène ? Sur l'image de la caméra ci-dessus, la pièce du bas semble être beaucoup plus froide que l'autre, alors qu'elles sont en réalité toutes les deux à la même température (celle trouvée par le thermocouple) puisqu'elles ont été chauffées à une même température. En effet, les deux objets sont à la même température mais comme ils ne présentent pas la même émissivité, ils n'émettent pas la même quantité d'énergie infrarouge. Ce qui explique qu'ils ne sont pas représentés par la même couleur sur le thermogramme capté par le capteur infrarouge de la caméra. En effet, la caméra thermique évalue la lecture d'un flux provenant d'un matériau et non une température ce qui errone alors nos mesures. La valeur de température affichée par la caméra est ainsi légèrement erronée car la caméra infrarouge n'exploite pas l'émissivité propre au matériau cible pour la mesure de sa température. Pour rappel, notre "corps noir" a une émissivité proche de 1, tandis que l'autre pièce a une émissivité plus faible. Dans notre expérience, l'émissivité était fixée à 0.95, mais ne connaissant pas le matériau que nous avons utilisé, nous ne pouvions pas fixer l'émissivité adaptée. Puisqu'en effet, les deux pièces étaient filmées simultanément par la caméra, celle-ci utilisait le même paramètre d'émissivité pour nos deux pièces. L'émissivité varie en fonction de l'état de la surface, de l'angle de visualisation, de la température et de la longueur d'onde spectrale. L'émissivité dans le spectre thermique varie selon la température, mais pas selon la couleur. L'émissivité dans le spectre visible varie quant à elle selon la couleur, mais pas selon la température. C'est pourquoi, lorsque nous avons colorié notre pièce en noir, nous avons changé son émissivité, pour nous approcher d'un corps noir.

### **3.3. Simulation du champ de températures et de sa vision adaptée à l'infrarouge**

Dans cette partie, notre objectif est de reproduire une vision humaine sensible afin d'effectuer une simulation du champ de températures obtenu dans notre pièce métallique lors de notre expérience en programmant un "œil infrarouge". Nous nous servons du logiciel Scilab et du module SIVP.

### 3.3.1. Simulation d'une vision adaptée à l'infrarouge

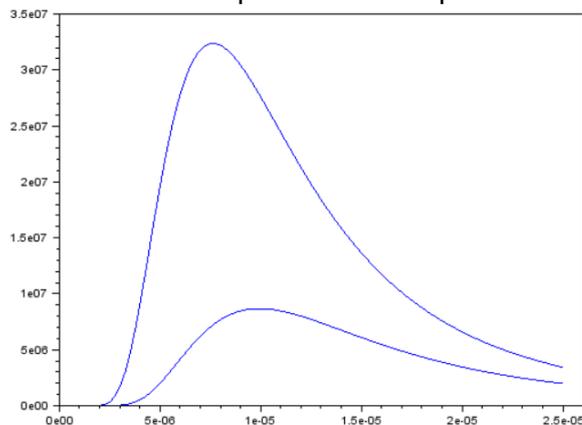
Nous allons dans un premier temps simuler l'évolution de la couleur de la pièce en fonction de sa température perçue par un œil sensible au rayonnement infrarouge. Pour cela, nous considérerons la pièce peinte en noir comme un corps noir afin de lui appliquer la loi de Planck. Dans la deuxième partie de notre rapport (celle de la caméra thermique), nous avons explicité la loi de Planck. Ici nous l'avons programmée sur le logiciel Scilab (**voir annexe numéro 1**). De ce fait, nous avons programmé la loi et avons fait en sorte de pouvoir la tracer en fonction d'une température choisie que le programme prend en variable d'entrée. Puis, pour reproduire le fonctionnement de la vision humaine, nous avons placé les filtres de la vision (rouge, vert et bleu) à l'aide de courbes de Gauss et calculé les aires sous chaque courbe pour obtenir des valeurs d'Intensité RGB. Ces dernières simulent la sensibilité des cônes et bâtonnets en fonction des couleurs. Dans un premier temps, nous avons disposé ces derniers aux valeurs réelles de sensibilité de la vision humaine pour montrer que l'œil humain ne perçoit qu'une partie infime de l'émission propre de la pièce. Les filtres sont centrés autour de 564 nm pour le rouge, 533 nm pour le vert et 437 nm pour le bleu. Voici les résultats obtenus :

```

IVert=          IBleu=          IRouge=
1.565D-11      1.221D-12      2.711D-09
  
```

**fig 8 : Intensités RGB des filtres placés dans le domaine visible pour un corps noir à 380K**

Nous obtenons logiquement des intensités quasiment nulles car le corps noir n'émet pas dans la gamme visible aux températures de notre pièce. C'est pourquoi nous avons adapté le placement de nos filtres aux gammes d'émission d'un corps noir dont la température varie entre 380K (température de la plaque) et 296K (température initiale de la pièce). Pour cela, nous avons tracé la loi de Planck du corps noir aux températures correspondantes.

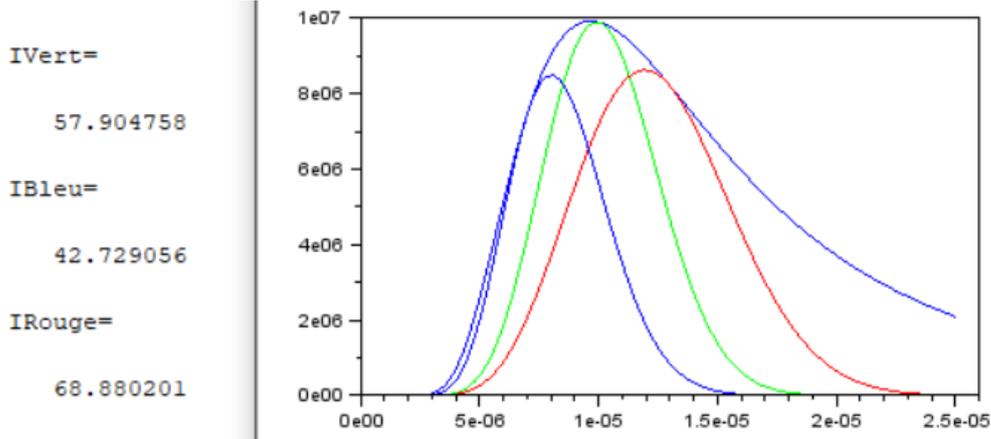


**fig 11 : Lois de Planck à 380K et 296K superposées**

Nous constatons un maximum pour une longueur d'onde d'environ 1E-5m soit 10000 nm à 296K et 8E-06 m soit 8000 nm à 380K. En utilisant la loi de Wien qui donne la longueur d'onde de l'intensité lumineuse maximale, nous trouvons  $\lambda_{max}^{380} = 7,63.10^{-12}m = 7630 \text{ nm}$  et  $\lambda_{max}^{296} = 9,79.10^{-12}m = 9790 \text{ nm}$ . Ces résultats correspondent à la loi de Planck précédemment obtenue. Cette loi dit également que plus la température est faible, plus la longueur d'onde d'intensité lumineuse maximale est grande. Cela explique les très faibles intensités dans la gamme visible pour un corps à 380K. Nous avons donc placé nos filtres autour de 9000 nm afin de traiter les longueurs d'onde adaptées à nos gammes de température. Les centres de filtres choisis sont : 13000 nm pour le rouge, 10000 nm pour le vert et 7000 nm pour le vert. Enfin, nous avons adapté la largeur des filtres à l'infrarouge. Le facteur d'augmentation de la largeur est proportionnel au déplacement du centre de nos filtres.

$$\text{facteurIR} = 10000 / 533$$

Voici un exemple de résultats obtenus à 300K :



**fig 13 : Intensités RGB à 300K**

Nous avons donc créé trois filtres nous permettant d'obtenir des valeurs intégrées d'intensité de Rouge, de Vert et de Bleu adaptés à l'émission de notre pièce. Nous allons désormais traiter ces valeurs afin d'obtenir une restitution de couleurs. Nous allons réaliser un mélange additif des couleurs avec 3 octets RGB : Red Green Blue en anglais. Nous avons donc à convertir les intensités en nombres entiers variant de 0 à 255 pour le Rouge, le Vert et le Bleu car  $2^8 = 256$  valeurs sont possibles sur un octet.

La couleur obtenue correspondra à un triplet où chaque valeur (RGB) est un nombre entier compris entre 0 et 255. Pour cela, nous définissons des Intensités références correspondant aux extremums d'intensité dans notre gamme de Températures (296-380 K). Nous les obtenons en deux étapes. Premièrement, nous utilisons la fonction Calcul donnant les intensités RGB pour les températures maximale et minimale. Puis nous définissons I<sub>max</sub> et I<sub>min</sub> comme le maximum et le minimum des six intensités obtenues. Nous nous servons de I<sub>max</sub> et I<sub>min</sub> pour convertir les intensités RGB en nos valeurs de pixel comprise entre 0 (correspondant à I<sub>min</sub>) et 255 (correspondant à I<sub>max</sub>) (voir annexe numéro 1). Nous stockons les valeurs des pixels RGB dans le tableau res.

Nous sommes maintenant capables de produire la couleur perçue par notre œil infrarouge du corps noir ayant une température comprise entre 296K et 380K.

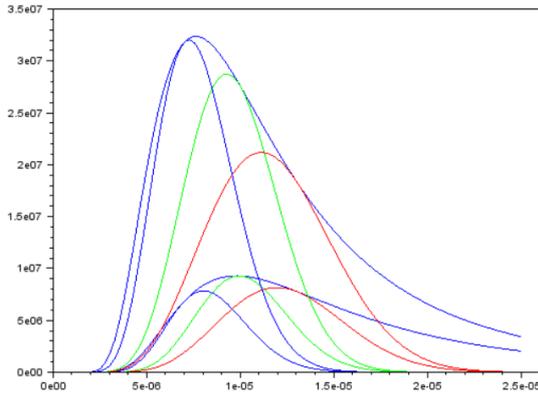
### 3.3.2. Application de cette vision à la pièce métallique de l'expérience

Notre objectif est maintenant de produire l'image de notre pièce métallique par le biais du programme précédent. Pour cela, nous traçons la pièce placée au centre de la plaque en appliquant la température de 380K (Température de la plaque) pour des rayons inférieurs au rayon intérieur de la pièce et supérieur au rayon extérieur de la pièce. Nous appliquons successivement les températures prises par la pièce (296K sur la figure ci-après) à tous les points compris entre les rayons intérieur et extérieur afin de visualiser l'évolution de la couleur en fonction de la température. (voir annexe 1)

Voici les couleurs perçues par notre œil infrarouge initialement :



**fig 14 : T=296K (initial)**



IVert=	IVert=
174.24876	54.5407
IBleu=	IBleu=
164.06433	39.677719
IRouge=	IRouge=
175.86075	65.560357

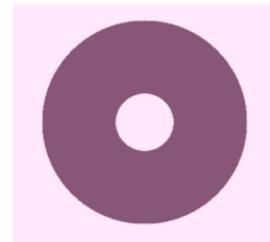
**fig 15 : Lois de Planck et filtres RGB à 296K et 380K superposées**

Les filtres appliqués aux lois de Planck expliquent le contraste de couleurs entre la pièce et la plaque chauffante. En effet, les intensités sont plus faibles à 296K qu'à 380K ce qui explique l'aspect plus sombre et sont proches les unes des autres. Cependant, le rouge est dominant car sa largeur est supérieure.

Puis, nous appliquons successivement les températures prises par la pièce afin de visualiser l'évolution de la couleur perçue en fonction de la température.



**fig 16 : T=314K (41°C) t=60s**



**fig 17 : T=338K (65°C) t=90s**



**fig 18 : T=350K (77°C) t=120s**



**fig 19 : T=369K (96°C) t=150s**

Plus la pièce chauffe, plus les intensités émises sont élevées et moins le rouge domine sur la couleur perçue. Ce phénomène est expliqué par la loi de Wien. Plus la Température du corps noir est faible, plus la longueur d'onde d'émission maximale augmente. Graphiquement, cela se traduit par un décalage du pic d'intensité vers de grandes longueurs d'onde. Ce décalage est visible sur Lois de Planck à 296K et 380K superposées et explique pourquoi le rouge est dominant à notre température initiale puis l'est de moins en moins au fur et à mesure que la température augmente.

**3.3.3. Résolution numérique de l'équation de la chaleur en coordonnées cylindriques axisymétriques de notre pièce métallique.**

Avant tout, il est important de réaliser la résolution numérique de l'équation de la chaleur en coordonnées cylindriques axisymétriques de notre pièce métallique. Pour cela notre professeur encadrant, Monsieur YON nous a aidés en nous expliquant la méthode puis

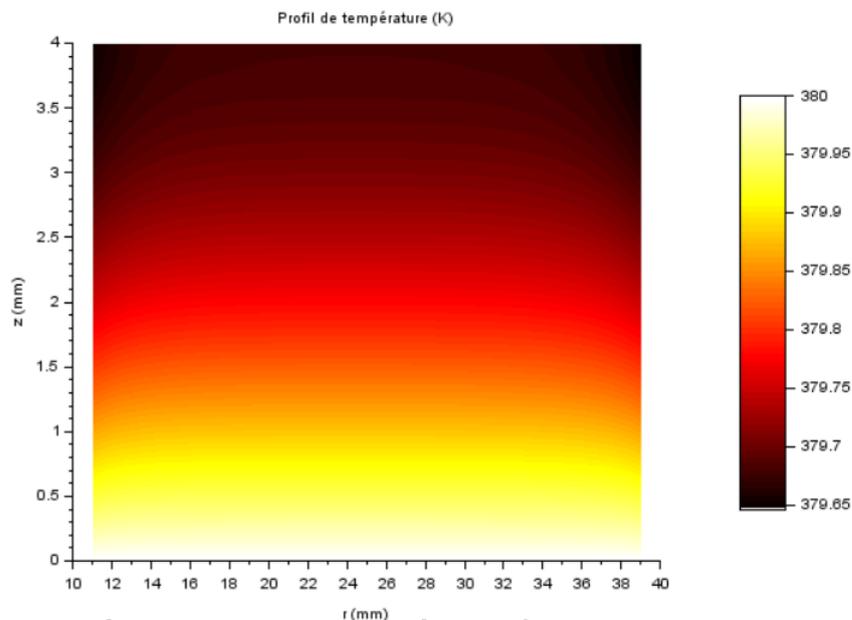
en apportant sa résolution numérique explicitée. Nous remercions ainsi vivement notre professeur pour cette aide apportée. De ce fait, nous pouvons expliciter cette résolution par quelques éléments. Tout d'abord, un schéma explicatif de la pièce métallique vue de coupe a permis de quadriller cette surface vue de coupe. Nous nous sommes alors placés en coordonnées cylindriques axisymétriques puisque nous rapportons dans un problème plan toute la partie incurvée de cette pièce cylindrique. Cela nous permet alors d'obtenir un champ de température de la pièce métallique dans notre plan ce qui nous aidera pour la suite de l'exportation de ce champ pour notre future modélisation. De ce fait, nous avons effectué un bilan local sur un volume élémentaire en coordonnées cylindriques, le champ de température dépend alors de la hauteur (z) et du rayon de la pièce (r). Nous obtenons ainsi une matrice de ce champ de température qui correspond à notre volonté de quadriller la coupe de notre pièce en infime position (i;j). Nous remarquons que la somme  $T(i,j)+T(i-1,j)+T(i+1,j)+T(i,j-1)+T(i,j+1)$  est nulle ce qui est un élément important, nous itérons cette démarche sur toute notre surface vue de coupe de la pièce. C'est à dire avec  $i=[Ri;Re]$  et  $j=[1;z]$ . Le calcul consiste alors à établir la convolution du champ de températures par cette matrice et d'imposer les conditions limites.

**Bord intérieur, extérieur et supérieur :**

Pour le bord intérieur, extérieur et supérieur, la pièce échange par convection avec l'extérieur et on remarque la présence de conduction au sein de la pièce ce qui nous permet d'obtenir trois conditions limites.

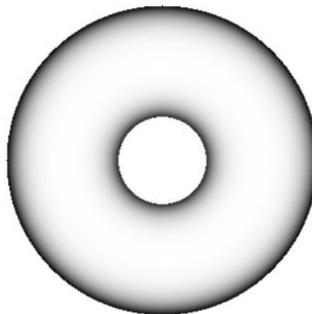
**Bord inférieur :**

Pour le bord inférieur la température de la pièce au point le plus bas de cette dernière qu'on note  $T(i,1)$  est égale à la température de la plaque qu'on note  $T_p$ . Après avoir explicité la démarche de la résolution numérique de l'équation de la chaleur en coordonnées cylindriques axisymétriques de notre pièce métallique, nous allons effectuer la programmation par Scilab pour ainsi pouvoir récupérer les données du champ de températures de la pièce (voir annexes 2 et 3) . Dans un premier temps, nous avons mis les conditions sur la pièce puis, nous avons créé un tableau pour le rayon allant lui du bord extérieur au bord intérieur de la pièce et un autre pour la hauteur correspondant à l'épaisseur de cette dernière. Ces deux tableaux nous ont aidé pour ainsi pouvoir créer une matrice de températures correspondant à l'intervalle du rayon et de la hauteur de la pièce sur une vue en coupe de cette dernière. Enfin, nous avons pu créer une fonction contenant les conditions sur les différents bords. De ce fait, nous avons obtenu les températures de chaque point de cette coupe, puis nous avons pu tracer le profil de températures de la pièce en fonction du rayon et de sa hauteur (voir photo ci-dessous).



**fig 20 : Profil de température au sein de la pièce en fonction du rayon et de l'épaisseur**

Nous remarquons que la température n'est pas uniforme au sein de la pièce ce qui vient contredire nos données utilisées dans la partie précédente. De plus, le champ de température varie selon le rayon et la hauteur. En effet, la température diminue lorsqu'on s'éloigne de la zone de contact avec la plaque chauffante ( $z=0\text{mm}$ ) et lorsqu'on s'éloigne du milieu de cette coupe de la pièce ( $r= 25\text{mm}$ ) selon la variable du rayon. Ainsi, nous pouvons déduire que les variations de températures au sein de la pièce sont dues aux effets convecto-conductifs présents sur les bords de la pièce. L'intérêt désormais est, à partir des données du champ de températures de la pièce, de reproduire la pièce vue par notre œil infrarouge sur Scilab. De ce fait, nous avons repris la structure du programme ayant été réalisée dans la partie précédente (annexe 1) mais ici en incluant non pas des valeurs de températures imposées mais en important les données précédemment exportées du programme (annexe 3). Nous avons conservé seulement les températures du sommet de la pièce pour ainsi pouvoir créer cette vue de haut de la pièce. C'est-à-dire,  $T(r,e)$  avec  $r$  variant,  $r = [R_i;R_e]$  et  $z$  constant,  $z = e$  (l'épaisseur de la pièce). Il était cependant impossible de visualiser la variation de températures de la pièce avec le traitement des intensités précédentes ; ces dernières étant trop faibles devant l'écart entre  $T_{\min}$  et  $T_{\max}$ . Nous avons donc modifié notre programme. Premièrement, nous avons adapté  $T_{\min}$  et  $T_{\max}$  qui correspondent désormais au minimum et au maximum du champ de températures du sommet de la pièce (nous nous intéressons ici uniquement à la pièce et plus à la plaque). Dans un second temps, nous avons adapté le traitement des intensités. En effet, afin d'être sensible aux faibles variations de température et donc aux faibles variations d'intensités RGB, nous définissons des intensités maximales et minimales pour le Rouge, le Vert et le Bleu (voir annexe 4). Nous avons alors pu obtenir une figure représentant la pièce métallique de dessus et montrant un dégradé sur les bords intérieurs et extérieurs symbolisant la variation de température.



**fig 21 : vision du champ de température simulée avec un contraste maximal**

Cependant, vous pouvez constater que la pièce est perçue en nuances de gris. Cela s'explique par le fait que l'on utilise des références ( $I_{\max}$  et  $I_{\min}$ ) pour chaque couleur. Ainsi, on oblige les valeurs Rouge, Vert et Bleu à être maximales (255) lorsque l'on se situe sur la Température Maximale et minimales (0) pour la Température minimale. Cela se traduit par une couronne blanche pour des rayons moyens et deux couronnes noires aux rayons limites de la pièce. Les transitions entre le noir et le blanc sont grises car les écarts de température étant si faibles, les lois de Planck sont presque superposées et les intensités RVB évoluent linéairement.

## **4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES**

### **4.1. Conclusion sur le travail réalisé**

Nous avons réussi à modéliser le champ de températures au sein d'une pièce, ce qui nous a aussi permis de comprendre le fonctionnement d'une caméra thermique.

Nous sommes également parvenus à visualiser le réchauffement de la pièce par un œil adapté à l'infrarouge.

Nous nous sommes mis en posture de scientifiques et d'ingénieurs, et avons su apporter une réponse cohérente et construite à une problématique technique.

Par ailleurs, nous pensons avoir été en capacité de mettre en perspective les différentes connaissances scientifiques et les résultats expérimentaux obtenus.

### **4.2. Conclusion sur l'apport personnel de cet EC projet**

Ce projet nous a permis d'étendre nos connaissances scientifiques à un domaine qui nous était jusque-là inconnu. La partie recherche nous a beaucoup intéressés, car ce fut pour nous l'occasion de nous renseigner sur des notions que nous ne connaissions que vaguement. Nous avons aussi apprécié la partie expérimentale. Notre choix d'expérience nous a effectivement paru passionnant : l'idée même de transposer la vision humaine dans le domaine infrarouge nous a beaucoup plu.

Au-delà des nouvelles connaissances physiques acquises, nous avons appris à nous adapter à Scilab en effectuant des recherches et en échangeant avec Mr Yon. Nous avons également gagné en autonomie et en organisation dans la résolution de problèmes survenant au fur et à mesure de la programmation, en identifiant la source de l'erreur et en trouvant des méthodes alternatives.

### **4.3. Perspectives pour la poursuite de ce projet**

Nous pensons que, pour la suite de ce projet P6 dans le domaine de l'imagerie et de la pyrométrie infrarouge, il serait intéressant de prendre en compte la nature du matériau, des phénomènes de réflexions et d'émissivité lors de la réalisation de nouveau de cette expérience.

De plus, nous pourrions aussi généraliser ce sujet en appliquant ce domaine de la pyrométrie infrarouge à la déperdition thermique de l'habitat.

## 5. BIBLIOGRAPHIE

[1] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Spectre\\_visible#/media/Fichier:EM\\_spectrumrevised\\_fr.png](https://fr.wikipedia.org/wiki/Spectre_visible#/media/Fichier:EM_spectrumrevised_fr.png), (valide à la date du 05/05/2021)

[2] <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-lumiere-326/>, (valide à la date du 06/05/2021)

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Dualit%C3%A9\\_onde-corpuscule#Fresnel,\\_Maxwell\\_et\\_Young](https://fr.wikipedia.org/wiki/Dualit%C3%A9_onde-corpuscule#Fresnel,_Maxwell_et_Young), valide à la date du 04/05/2021

[3] <https://askabiologist.asu.edu/batonnets-et-cones>, (valide à la date du 06/05/2021)

[4] <https://www.doctissimo.fr/sante/dictionnaire-medical/cones-et-batonnets> (valide à la date du 06/05/2021)

[5] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Corps\\_noir](https://fr.wikipedia.org/wiki/Corps_noir) (valide à la date du 06/05/2021)

[6] <https://www.keller.de/fr/its/home/applications/theorie/emissivite.htm> (valide à la date du 06/05/2021)

<https://www.thermoconcept-sarl.com/documents/emissivite/> (valide à la date du 06/05/2021)

[7] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Cam%C3%A9ra\\_thermique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Cam%C3%A9ra_thermique) (valide à la date du 06/05/2021)

<https://www.testoon.com/guides--p-83960> (source image) (valide à la date du 06/05/2021)

[http://www-iut.univ-lille1.fr/LP\\_VI/projets/rapport\\_Camera\\_Infrarouge\\_09.pdf](http://www-iut.univ-lille1.fr/LP_VI/projets/rapport_Camera_Infrarouge_09.pdf) (valide à la date du 06/05/2021)

## 6. ANNEXES

### 6.1. Annexe 1 : programme vue infrarouge

```

VueIR.sci
1 clear
2
3
4 TailleX=40*9//longueur-image
5 TailleY=40*16//largeur-image
6 rint=11E-3//rayon-intérieur-en-m
7 rext=39E-3//rayon-extérieur-en-m
8 facteurIR=10000/533
9 Nbp=400
10
11
12
13 Reso=(TailleX/(2*rext*1.2))
14
15
16 Tpiece=300//Température-de-la-pièce-en-K
17
18 Tmin=296
19 Tmax=380
20
21
22 lambdamin=0.0001e-9
23 lambdamax=27000E-9
24
25 lambda = linspace(lamdamin, lambdamax, Nbp);
26 dlambd=(lambdamax-lamdamin)/Nbp
27
28
29 .....//Définition-de-la-loi-de-Planck
30 function resultat=planck(lambda,T) //lambda-en-nanomètre
31 ....h=6.62607015e-34; //constante-de-Planck-en-J.s-1
32 ....c=299792458; //célérité-de-la-lumière-dans-le-vidé-en-m.s-1
33 ....k=1.38e-23; //constante-de-Boltzmann
34 ....resultat =2*h*c^2*ones(lambda)./lambda.^5./(exp(h*c/k/T*ones(lambda)./lambda)-1);
35 endfunction
36
37 //Définition-des-Filtres-RGB
38
39
40 function resultat=FTIRouge(lambda) //lambda-en-nanomètre
41 ....centre=13000E-9
42 ....largeur=200E-9*facteurIR
43 ....resultat =exp(-1/2*(lambda-centre).^2/largeur^2);
44 endfunction
45
46
47 function resultat=FTVert(lambda) //lambda-en-nanomètre
48 ....centre=10000E-9
49 ....largeur=150E-9*facteurIR
50 ....resultat =exp(-1/2*(lambda-centre).^2/largeur^2);
51 endfunction
52

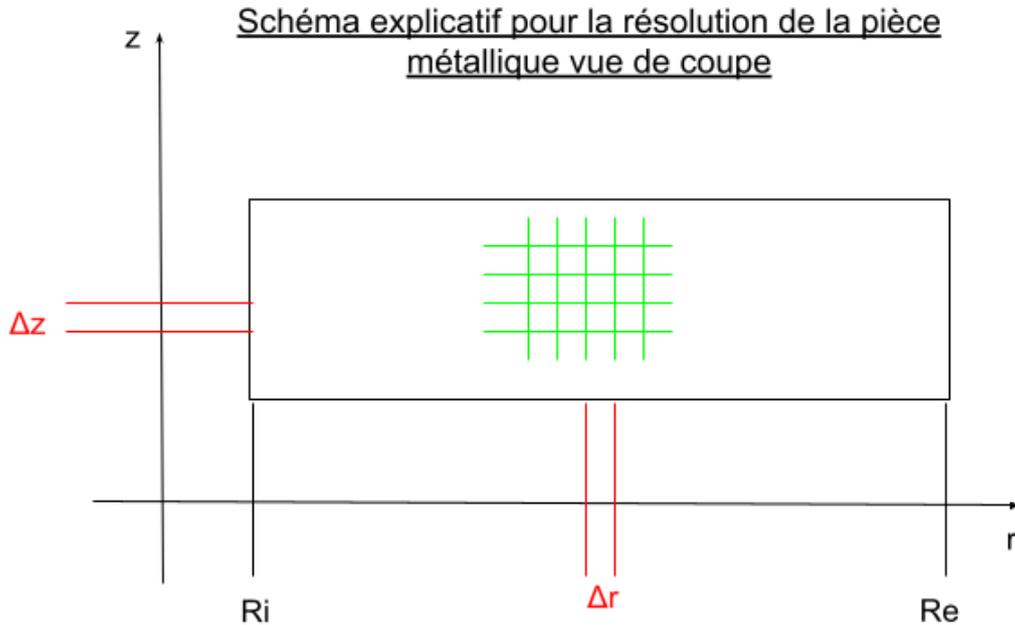
```

```

53
54 function resultat=FTBleu(lambda) //lambda-en-nanometre
55 ....centre=7000E-9
56 ....largeur=150E-9*facteurIR
57 ....resultat:=exp(-1/2*(lambda-centre).^2/largeur^2);
58 endfunction
59
60 //Calcul-des-Intensités-en-fonction-de-la-température
61 function [IVert,IBleu,IRouge]=CalculI(T)
62 .....LCN=planck(lambda,T)
63 .....Vert=FTVert(lambda)
64 .....Bleu=FTBleu(lambda)
65 .....Rouge=FTRouge(lambda)
66 .....IVert=sum(LCN.*Vert*dlambda)
67 .....IBleu=sum(LCN.*Bleu*dlambda)
68 .....IRouge=sum(LCN.*Rouge*dlambda)
69 endfunction
70
71 [IVTmin,IBTmin,IRTmin]=CalculI(Tmin)
72 [IVTmax,IBTmax,IRTmax]=CalculI(Tmax)
73
74 //Définition-de-Imax-et-Imin
75 Imax=max(IVTmin,IBTmin,IRTmin,IVTmax,IBTmax,IRTmax)
76 Imin=min(IVTmin,IBTmin,IRTmin,IVTmax,IBTmax,IRTmax)
77
78
79 //pièce
80
81 function res=cercle(m,n,rint,rect,Reso)
82 for i=1:m
83 ....for j=1:n
84 .....r=(sqrt((i-int(m/2))^2+(j-int(n/2))^2))/Reso
85 .....if r<rint || r>rect then //centre-et-exterieur-de-la-pièce
86 .....T=380
87 ..... [IVert,IBleu,IRouge]=CalculI(T)
88 .....else //pièce
89 .....T=Tpiece
90 ..... [IVert,IBleu,IRouge]=CalculI(T)
91 .....end
92 .....res(i,j,1)=(IRouge-Imin)/(Imax-Imin)*255
93 .....res(i,j,2)=-(IBleu-Imin)/(Imax-Imin)*255
94 .....res(i,j,3)=-(IVert-Imin)/(Imax-Imin)*255
95 ....end
96 end
97 res=uint8(res)
98 endfunction
99
100
101 img=cercle(TailleX,TailleY,rint,rect,Reso)
102 imshow(img)
103

```

**6.2. Annexe 2 : Résolution numérique de l'équation de la chaleur en coordonnées cylindriques axisymétriques**



Bilan local sur un volume élémentaire

$$\Delta T(r, z) = 0$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0$$

Avec le développement de Taylor on montre que

$$\frac{1}{r} \frac{T(r + \Delta r, z) - T(r, z)}{\Delta r} + \frac{T(r - \Delta r, z) - 2T(r, z) + T(r + \Delta r, z)}{(\Delta r)^2} + \frac{T(r, z - \Delta z) - 2T(r, z) + T(r, z + \Delta z)}{(\Delta z)^2}$$

$$= T(r, z) * \left( \frac{-1}{r\Delta r} - \frac{2}{(\Delta r)^2} - \frac{2}{(\Delta z)^2} \right) + T(r - \Delta r, z) * \frac{1}{(\Delta r)^2} + T(r + \Delta r, z) * \left( \frac{1}{(\Delta r)^2} + \frac{1}{r\Delta r} \right)$$

$$+ T(r, z - \Delta z) * \frac{1}{(\Delta z)^2} + T(r, z + \Delta z) * \frac{1}{(\Delta z)^2} = 0.$$

Soit  $\Delta r = \Delta z = \Delta$ .

$$-T(i, j) \left(4 + \frac{\Delta r}{r}\right) + T(c-1, j) + T(i+1, j) \left(1 + \frac{\Delta r}{r}\right) + T(i, j-1) + T(c, j+1) = 0.$$

<b>J+1</b>		<b>1</b>	
<b>J</b>	<b>1</b>	$-\left(4 + \frac{\Delta r}{r}\right)$	$\left(1 + \frac{\Delta r}{r}\right)$
<b>j-1</b>		<b>1</b>	
	<b>i-1</b>	<b>i</b>	<b>i+1</b>

⇒ Somme nulle

Le calcul consiste donc en la convolution du champ de températures par cette matrice et d'imposer les conditions limites.

**Calcul des conditions limites :**

Bord intérieur :

$$-k \overrightarrow{\text{grad}}(T) \cdot (-\vec{U}_r) = k(T(R, z) - T_{\text{ext}})$$

$$k \frac{\partial T}{\partial r}(Ri) = hT(Ri - T_{\text{ext}})$$

$$\Rightarrow k \frac{T(2, j) - T(1, j)}{\Delta r} = h(T(1, j) - T_{\text{ext}})$$

$$T(2, j) - T(1, j) = \frac{h\Delta r}{k} T(1, j) - \frac{h\Delta r}{k} T_{\text{ext}}$$

$$T(1, j) \left(\frac{h\Delta r}{k} + 1\right) = T(2, j) + \frac{h\Delta r}{k} T_{\text{ext}}$$

$$T(1, j) = \frac{T(2, j) + \frac{h\Delta r}{k} T_{\text{ext}}}{1 + \frac{h\Delta r}{k}}$$

Bord extérieur :

$$-k \overrightarrow{\text{grad}}(T) \cdot (-\vec{U}_r) = k(T(Re, z) - T_{ext})$$

$$k \frac{\partial T}{\partial r}(Re) = hT(Re - T_{ext})$$

$$\Rightarrow k \frac{T(\mathcal{S}, j) - T(\mathcal{S} - 1, j)}{\Delta r} = h(T(\mathcal{S}, j) - T_{ext})$$

$$T(\mathcal{S}, j) - T(\mathcal{S} - 1, j) = \frac{h\Delta r}{k}(T_{ext} - T(\mathcal{S}, j))$$

$$T(\mathcal{S}, j) \left(1 + \frac{h\Delta r}{k}\right) = \frac{h\Delta r}{k}T_{ext} + T(\mathcal{S} - 1, j)$$

$$T(1, j) = \frac{\frac{h\Delta r}{k}T_{ext} + T(\mathcal{S} - 1, j)}{1 + \frac{h\Delta r}{k}}$$

Bord supérieur :

$$-k \overrightarrow{\text{grad}}(T) \cdot (-\vec{U}_r) = k(T_{sup} - T_{ext})$$

$$k \frac{\partial T}{\partial r}(z = e) = hT(T_{sup} - T_{ext})$$

$$\frac{T(i, \mathcal{S}) - T(i, \mathcal{S} - 1)}{\Delta z} = \frac{h}{k}(T_{ext} - T(i, \mathcal{S}))$$

$$T(i, \mathcal{S}) \left(\frac{h\Delta z}{k} + 1\right) = \frac{h\Delta z}{k}T_{ext} + T(i, \mathcal{S} - 1)$$

$$T(i, \mathcal{S}) = \frac{\frac{h\Delta z}{k}T_{ext} + T(i, \mathcal{S} - 1)}{1 + \frac{h\Delta z}{k}}$$

Bord inférieur :

Condition de température  $T(i, 1) = T_p$

### 6.3. Annexe n°3 : Programme simulation du champ de températures

```

ChampTempCylindrique.sce
1 clear
2 cd.'C:\Users\alexi\Desktop\4eme semestre\P6'
3
4 Ri=11E-3 //rayon.intérieur.en.m
5 Re=39E-3 //rayon.extérieur.en.m
6 e=0.4E-3 //épaisseur.de.la.pièce.en.m
7 Nbz=50
8 Text=296 //Température.extérieure.en.K
9 Tp=380 //température.imposée.par.la.plaque
10 h=10 //Coefficient.de.convection.thermique
11 k=80 //conductivité.pièce
12 Precision=1E-6
13 div=50
14 itermax=300
15 pasaffichage=50
16
17 delta=e/(Nbz-1)
18 rTab=[Ri:delta:Re];
19 zTab=[0:delta:e];
20 Nbr=size(rTab,'*')
21 Temp=(Text)*ones(Nbr,Nbz);
22 err=100
23 Bi=h*delta/k
24 iter=0
25
26 while err>Precision | iter<itermax
27     TempBis=zeros(Nbr,Nbz);
28     for i=2:Nbr-1
29         for j=2:Nbz-1
30             TempBis(i,j)=-Temp(i,j)*(4+delta/rTab(i))+Temp(i-1,j)+Temp(i,j-1)+Temp(i,j+1)+Temp(i+1,j)*(1+delta/rTab(i));
31         end
32     end
33
34     Temp=Temp+TempBis/div;
35     //Conditions limites
36
37     for i=1:Nbr
38         //surface inférieure
39         Temp(i,1)=Tp
40         //Surface supérieure
41         Temp(i,2)=(Temp(i,1)+Bi*Text)/(1+Bi)
42     end
43     for j=1:Nbz
44         //rayon intérieur
45         Temp(1,j)=(Temp(2,j)+Bi*Text)/(1+Bi)
46         //rayon extérieur
47         Temp(2,j)=(Temp(1,j)+Bi*Text)/(1+Bi)
48     end
49     err=max(TempBis/div);
50     disp(err)
51     if modulo(iter,pasaffichage)==1 then
52         clf
53         Sgrayplot(rTab*1000,zTab*1000,Temp)
54         gcf().color_map = hotcolormap(64);
55         colorbar(min(Temp),max(Temp))
56         xtitle('Profil.de.température.(K)','r.(mm)','z.(mm)')
57     end
58     iter=iter+1
59 end
60 Export=[rTab' Temp(:,2)]
61 fprintfMat('Export.txt',Export,'%e')
62

```

## 6.4. Annexe n°4 : Programme contraste augmenté

```

Dégradé sci
1 clear
2 cd 'C:\Users\alexi\Desktop\4eme-semester\P6'
3
4
5 TailleX=40*9//longueur-image
6 TailleY=40*16//largeur-image
7 rint=11E-3//rayon-intérieur-en-m
8 rext=39E-3//rayon-extérieur-en-m
9 facteurIR=10000/533
10 Nbp=400
11
12
13
14 Reso=(TailleX/(2*rext*1.2))
15
16 //Lecture-fichier
17 Import=fscanfMat('Export.txt')
18 rTab=Import(:,1);
19 TTab=Import(:,2);
20 d=splin(rTab,TTab);
21
22
23 Tmin=min(TTab)
24 Tmax=max(TTab)
25
26
27 lambdamin=0.0001e-9
28 lambdamax=27000E-9
29
30
31 lambda = linspace(lambdamin,lambdamax,Nbp);
32 dlambda=(lambdamax-lambdamin)/Nbp
33
34
35 .....//Définition-de-la-loi-de-Planck
36 function resultat=planck(lambda,T)//lambda-en-nanomètre
37 ....h=6.62607015e-34;//constante-de-Planck-en-J.s-1
38 ....c=299792458;//célérité-de-la-lumière-dans-le-vide-en-m.s-1
39 ....k=1.38e-23;//constante-de-Boltzmann
40 ....resultat =2*h*c^2*ones(lambda)./lambda.^5./(exp(h*c/k/T*ones(lambda)./lambda)-1);
41 endfunction
42
43 //Définition-des-Filtres-RGB
44
45
46 function resultat=FTRouge(lambda)//lambda-en-nanomètre
47 ....centre=13000E-9
48 ....largeur=200E-9*facteurIR
49 ....resultat =exp(-1/2*(lambda-centre).^2/largeur^2);
50 endfunction
51

```

```

52
53 function resultat=FTVert(lambda) //lambda-en-nanometre
54 ----centre=10000E-9
55 ----largeur=150E-9*facteurIR
56 ----resultat=exp(-1/2*(lambda-centre).^2/largeur^2);
57 endfunction
58
59
60 function resultat=FTBleu(lambda) //lambda-en-nanometre
61 ----centre=7000E-9
62 ----largeur=150E-9*facteurIR
63 ----resultat=exp(-1/2*(lambda-centre).^2/largeur^2);
64 endfunction
65
66 //Calcul-des-Intensités-en-fonction-de-la-température
67 function [IVert,IBleu,IRouge]=CalculI(T)
68 -----LCN=planck(lambda,T*100)
69 -----Vert=FTVert(lambda)
70 -----Bleu=FTBleu(lambda)
71 -----Rouge=FTRouge(lambda)
72 -----IVert=sum(LCN.*Vert*dlambda)
73 -----IBleu=sum(LCN.*Bleu*dlambda)
74 -----IRouge=sum(LCN.*Rouge*dlambda)
75 endfunction
76
77 [IVTmin,IBTmin,IRTmin]=CalculI(Tmin)
78 [IVTmax,IBTmax,IRTmax]=CalculI(Tmax)
79
80 //Définition-de-Imax-et-Imin-pour-chaque-couleur
81 ImaxR=max(IRTmin,IRTmax)
82 IminR=min(IRTmin,IRTmax)
83
84 ImaxB=max(IBTmin,IBTmax)
85 IminB=min(IBTmin,IBTmax)
86
87 ImaxV=max(IVTmin,IVTmax)
88 IminV=min(IVTmin,IVTmax)
89

```

```

90 //pièce
91
92 function res=cercle(m,n,rint,rest,Reso)
93 for i=1:m
94     for j=-1:n
95         r=(sqrt((i-int(m/2))^2+(j-int(n/2))^2))/Reso
96         if r<rint | r>rest then //centre-et-exterieur-de-la-pièce
97             T=Tmax
98             [IVert,IBleu,IRouge]=CalculI(T)
99         else //pièce
100            T=interp(r,rTab,TTab,d)
101            [IVert,IBleu,IRouge]=CalculI(T)
102        end
103        res(i,j,1)=((IRouge-IminR)/(ImaxR-IminR))*255
104        res(i,j,2)=((IBleu-IminB)/(ImaxB-IminB))*255
105        res(i,j,3)=((IVert-IminV)/(ImaxV-IminV))*255
106    end
107 end
108 res=uint8(res)
109 endfunction
110
111
112
113 img=cercle(TailleX,TailleY,rint,rest,Reso)
114 imshow(img)
115

```