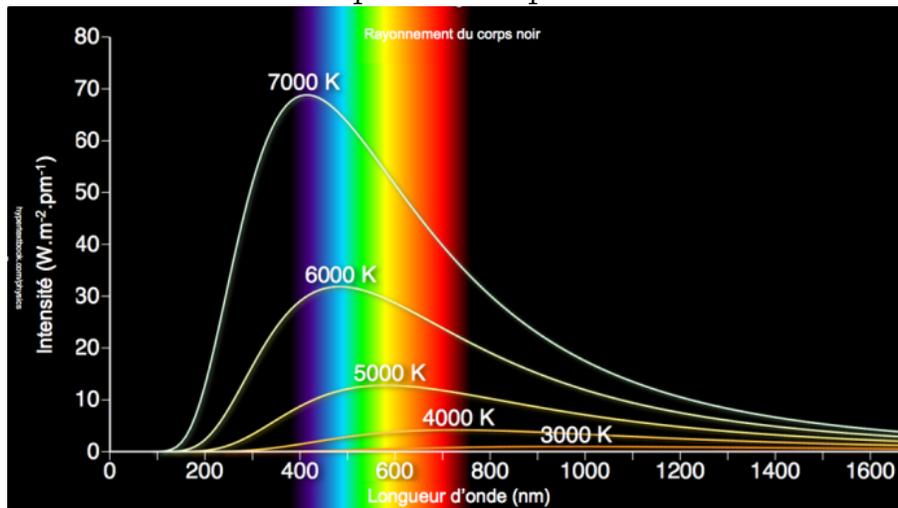


Projet de physique P6 Mesure de température de flamme par spectroscopie



Étudiants :
STIKI Othmane
DOUCE Simon
MUNOZ Miguel
VINCENT Gaétan

Enseignant responsable du projet :
YON Jérôme

18 juin 2017

Date : 19/06/2017

Référence : STPI/P6/2017 – 47

Intitulé : Mesure de température de flamme par spectroscopie d'émission

Type : Recherche documentaire, Expérimental, Calculs, Modélisation informatique

Objectifs : Après une découverte des méthodes classiques de mesure de température d'une flamme, le projet repose sur l'interprétation du rayonnement d'une flamme. Par l'analyse des spectres d'émission de cette flamme, le but est d'en déduire sa température. Enfin, le dernier objectif consiste à évaluer les sources d'erreurs de ce procédé optique de mesure de température.

Mots-clefs : Spectroscopie, Flamme, Température

Table des matières

I	Introduction	4
1	Objectif du projet et contexte de travail	4
2	Définition des termes du sujet	4
3	Un peu d'histoire	6
4	La mesure optique de température de flamme, un enjeu important	6
II	Méthodologie, organisation du travail	7
III	Problème : Comment modéliser l'émission lumineuse ?	8
5	Modélisation de l'émission idéale d'un corps noir grâce à la loi de Planck	8
6	Modélisation de l'émission d'une flamme	10
6.1	Notion d'émissivité	10
6.2	Le coefficient d'absorption	10
6.3	Conclusion	11
IV	Problème : Comment mesurer la température d'une flamme ?	11
7	Méthode de Pyrométrie	12
8	Présentation de l'expérience	12
9	Résultats	14
10	Modélisation de la flamme	15
10.1	Modélisation de la fraction volumique en suie	16
10.2	Modélisation de la température dans une flamme	18
11	Interprétation et regard critique sur les résultats	20

Première partie

Introduction

1 Objectif du projet et contexte de travail

Dans le cadre de notre cursus étudiant, prévu par l'INSA de Rouen, nous suivons une formation d'ingénieur très complète. En effet, nous avons dû réaliser, pour les semestres précédents, un projet en Communication, en Mathématique, en Informatique, et enfin, pour ce 4ème semestre, un projet en Physique. Le but d'un tel projet dans notre formation est de nous apprendre à travailler en groupe, de savoir nous répartir des tâches et de respecter un délai, tout en appréhendant une démarche scientifique, en cohérence avec notre métier futur. Nous avons donc travaillé sur ce projet, sans forcément nous connaître, comme nous pourrions y être amené, plus tard, dans un contexte professionnel. Ce projet est également à portée éducative, car pour cette année, il a été prévu de réaliser un poster, dans le but d'afficher notre démarche, d'expliquer notre sujet à d'autres étudiants, pour éveiller leur curiosité et stimuler leur goût pour la science. Nous avons choisi notre sujet parmi une liste de 53 sujets, regroupant des projets ayant des rapports plus ou moins proches aux différentes matières enseignées à l'INSA de Rouen : chimie, astrophysique, électronique, mécanique, etc...

Pour notre part, nous avons sélectionné un sujet intitulé : Mesure de température de flamme par spectroscopie d'émission. Il fut encadré par notre professeur référent, Jérôme Yon, professeur à l'INSA et chercheur à Coria. Nous nous rejoignons alors chaque mercredi matin dans les salles de TP de Physique afin d'avancer sur notre projet. Notre travail consistait principalement à effectuer des recherches sur des phénomènes physiques, à réaliser une étude numérique sur l'émission d'une flamme et enfin à établir une démarche pour déterminer la température d'une flamme en laboratoire. Pour cela nous avons dû modéliser les paramètres qui caractérisent une flamme sur le logiciel Scilab. Nous avons donc pu appréhender la manière dont les chercheurs effectuent leur travaux en adoptant une démarche scientifique.

2 Définition des termes du sujet

Au début de notre projet, nous nous sommes interrogés sur le sens du sujet de notre projet : « Mesure de température de flamme par spectroscopie d'émission ». Nous allons tout d'abord définir ces termes pour y voir plus clair.

- Mesure : Action d'évaluer une grandeur d'après son rapport avec une grandeur de même espèce, prise comme unité et comme référence. (Larousse)
- Température : Grandeur physique liée à la notion immédiate de chaud et froid. Deux corps en contact ont tendance à égaliser leurs températures, par échange de chaleur (équilibre thermique). Les thermomètres

fournissent une mesure de la température en utilisant des phénomènes comme la variation de la pression des gaz, ou la dilatation thermique de corps. La physique statistique montre que la température est la manifestation, à l'échelle macroscopique, du mouvement des atomes et molécules. Elle est directement liée à l'énergie cinétique moyenne des constituants microscopiques de la matière. L'unité S.I. de température est le kelvin ; le degré Celsius est couramment utilisé. (FuturaSciences)

- Flamme : Mélange gazeux en combustion, dégageant de la chaleur et généralement de la lumière, produit par une matière qui brûle. (cnrtl)
- Spectroscopie : Analyse des corps par l'examen visuel de leur spectre d'absorption ou d'émission au moyen d'un spectroscopie. (cnrtl)
- Émission : Fait d'émettre (une radiation, une substance, un rayonnement). (cnrtl)
- Absorption : Phénomène par lequel un milieu matériel soustrait une partie de leur énergie à des rayonnements électromagnétiques. (Larousse)
- Rayonnement : Un rayonnement, synonyme de radiation, désigne le processus d'émission ou de propagation d'énergie et de quantité de mouvement impliquant une onde, une particule. (Wikipédia)
- Corps noir : Un corps noir est un corps capable d'absorber complètement toutes les radiations électromagnétiques incidentes sur sa surface. Il émet des radiations comprises dans un spectre caractéristique qui dépend exclusivement de la température absolue. À chaque valeur de la température correspond une longueur d'onde dominante. (Futura Sciences)
- Émissivité : L'émissivité correspond au flux radiatif émis par un élément de surface à température donnée, rapporté à la valeur de référence qu'est le flux émis par un corps noir à cette même température. Il correspond au rapport de la luminance du corps réel sur la luminance du corps noir porté à la même température : $\varepsilon = \frac{L(T)}{L^\circ(T)}$ (Wikipédia)
- Luminance : La luminance désigne le signal qui détermine les valeurs de contraste d'une image, du noir le plus profond jusqu'au blanc le plus pur. La luminance est le flux émis par unité de surface apparente et par unité d'angle solide. ($Cd/m^2, W/m^2/sr, photons/s/m^2/sr$) (Futura Sciences)
- Émittance (ou exittance) : L'émittance correspond au flux lumineux émis par unité de surface d'une source lumineuse étendue. ($W.m^{-2}$) (Wikipédia)
- Suie : La suie est un ensemble de composés chimiques résultant de la combustion incomplète de combustibles fossiles et de biomasse. Les suies se présentent sous la forme de substances solides ou goudronneuses d'aspect noirâtre et riches en carbone. (Wikipédia)
- Pyrométrie : Science qui étudie les hautes températures ; ensemble des techniques utilisées pour la mesure des hautes températures. (CNRTL)

Avec toutes ces définitions, nous sommes en mesure d'en apprendre un peu plus sur ce sujet.

3 Un peu d'histoire

Afin de mieux cerner le sujet, il est nécessaire d'évoquer la partie historique de ce dernier :

Il existe trois types différents de transfert thermique :

- le transfert par conduction, qui est un transfert de chaleur sans transfert de matière (solide)
- le transfert par convection, qui est un transfert de chaleur avec transfert de matière (liquide)
- le transfert par rayonnement, associé à l'émission d'onde électromagnétique. (tout corps)

L'électromagnétisme et le rayonnement en particulier est un domaine de la physiques qui est apparu relativement tard vis à vis des autres domaines. En effet, le premier à avoir mis en évidence le spèctre solaire fut Newton en 1668. En 1800, William Herschel, un autre britannique, met en lumière les propriétés calorifiques du rayonnement infrarouge. En 1895, deux autres scientifiques, Rayleigh et Wien, parviennent à établir des formules empiriques donnant la répartition de l'énergie en fonction de la température et de la longueur d'onde. Leurs découvertes nous seront grandement utiles pour la suite de notre projet. En 1862, Kirchhoff introduit la notion de corps noir. Son élève Planck parvient en 1900 à faire le lien avec les deux lois empiriques de Wien et Rayleigh en introduisant la notion de corpuscules et en établissant une loi liant la puissance émise par un corps noir, la longueur d'onde du rayonnement émis ainsi que sa température.

C'est donc la température du corps qui pilote son rayonnement, puisque tout corps porté à une température supérieure au degré absolu dégage un rayonnement. Tout le but de notre projet réside dans la mesure d'une telle température : par l'analyse du rayonnement d'une flamme, nous pouvons en déterminer une température. Cette mesure a des applications diverses, dans l'industrie, dans la maîtrise d'incendie, ou encore dans l'étude de volcans. Pour se faire, il est utilisé des appareils de mesure tels que les pyromètres.

En 1911, le premier terme de pyromètre infrarouge est employé, et en 1930 apparaissent les premiers pyromètres infrarouges.

4 La mesure optique de température de flamme, un enjeu important

Les flammes sont le lieu d'une réaction chimique entre un ou plusieurs gaz avec l'air. Ces 2 réactifs se rencontrent à l'interface entre la flamme et le milieu ambiant dans le cas d'une flamme de diffusion et peuvent être mélangés avant la combustion dans une flamme de prémélange. On les retrouve dans de nombreux domaines comme l'industrie ou la production d'énergie. Il est donc nécessaire de savoir les contrôler et mesurer leur température avec précision.

Pour réaliser cette mesure, des méthodes intrusives (non optiques) sont très répandues. Ces méthodes qui mettent en contact un appareil de mesure avec la flamme présentent des inconvénients. En effet, elles sont susceptibles d'engendrer

des modifications du comportement de la combustion, et de la suie peut se déposer sur le matériel de mesure ce qui a pour conséquence une incertitude élevée sur la température obtenue.

Sans rentrer dans les détails techniques de ces méthodes, voici les plus connues :

- Les sondes à aspiration
- Les thermocouples
- Les sondes en couches minces

Toutes ces méthodes présentent leurs avantages et leurs inconvénients, mais pour des mesures de températures de haute précision, pour les fortes températures, les erreurs deviennent trop élevées. C'est pourquoi d'autres méthodes alternatives sont recherchées : c'est notamment le cas des méthodes de mesure optique (non intrusives) qui sont au centre de ce projet. Plus précisément, nous aborderons les méthodes reposant sur l'analyse spectrale de l'émission, puis nous vous présenterons l'expérience réalisée ainsi que son interprétation et ses éventuelles limites.

Deuxième partie

Méthodologie, organisation du travail

Nous travaillions de façon régulière chaque semaine, en nous retrouvant ensemble chaque semaine en salle de TP avec notre professeur. Nous étions au début assez perdu sur l'ensemble d'informations que nous offrait notre projet. Après que notre professeur nous ait expliqué les différents phénomènes mis en jeu lors de l'émission d'une flamme, son rayonnement, sa composition, sa température, nous avons déjà un peu plus de matières afin d'y voir plus clair. Nous avons donc sélectionné certains mots clefs (corps noirs, rayonnement, émissivité, luminance, suies, Planck, Wien, Rayleigh, ...) et avons pu entamer des recherches, sur internet principalement.

Nous avons chacun cherché de notre côté différentes informations, et nous nous les sommes expliquées mutuellement pour gagner du temps. Ce sujet étant assez pointu, nous sommes tombés sur de nombreux articles et thèses réalisés par d'autres chercheurs ou doctorants. Ces mines d'informations parfois compliquées à comprendre et analyser nous ont servi de point de départ pour commencer la partie modélisation de la flamme. C'est notamment le cas d'un article intitulé « Mesures de la taille et de la concentration de la suie dans une flamme laminaire pré-mélangée » par une équipe de chercheurs pour l'Institut français du pétrole, en 2006. Beaucoup d'interrogations se sont alors soulevées, et M.Yon fut une aide précieuse pour tout comprendre. Il nous a alors indiqué de quelle façon réaliser sous Scilab, le profil de température d'une flamme à l'aide des informations tirées de l'article, et des connaissances acquises lors de nos recherches. Chaque

semaine, il nous indiquait quel était l'ordre du jour de la semaine suivante pour suivre le bon déroulement, car nous avions du mal à savoir dans quelle direction aller. Nous travaillons alors toujours en groupe pour tenter de tout comprendre. Le but souhaité par notre professeur était d'être capable de réaliser un tel profil de température de flamme, à l'aide de la répartition des suies présentes au sein de cette flamme. Puis de ce profil, parvenir à associer, à l'aide des lois physiques prévues par Planck, un spectre de rayonnement thermique à cette flamme. Ce projet trouverait alors une finalité en analysant le profil spectral d'une flamme, déterminée en laboratoire, afin de déterminer les températures présentes au sein de la flamme.

Méthodologie / Organisation du travail

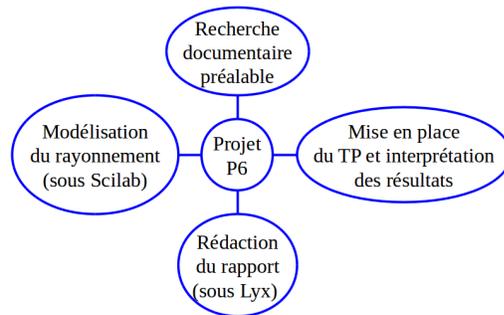


FIGURE 1 – Organisation du travail

Troisième partie

Problème : Comment modéliser l'émission lumineuse ?

5 Modélisation de l'émission idéale d'un corps noir grâce à la loi de Planck

Max Planck s'est intéressé à l'émission idéale d'une surface incandescente, c'est à dire d'un corps noir. En 1900, il a déterminé une formule permettant de déterminer la luminance énergétique spectrale d'un corps noir par unité de fréquence. Ainsi, pour certaine température le corps noir émet avec une certaine intensité, et pour certaines longueurs d'onde, de la lumière. Ce corps absorbe toute l'énergie électromagnétique qu'il reçoit et réémet ensuite, sous forme de

rayonnement, cette énergie. Ce corps étant hypothétique, il n'existe pas dans la nature. Il correspond à un corps idéal, et sert donc de référence pour tous les autres corps. On peut ainsi comparer les comportements des autres corps à celui d'un corps noir. La loi de Planck a permis de mettre en lien la Loi de Wien et celle de Rayleigh-Jeans, qui permettait déjà d'évaluer la luminance d'un corps. Cependant, chacune d'elle ne fonctionnait que pour une partie du spectre. Le travail de Planck, nous mène donc à la formule suivante :

$$L_{\lambda} = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \times \frac{1}{e^{\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right)} - 1}$$

Avec :

- La luminance : L_{λ} en $W/m^2/sr$
- La constante de Planck : $h = 6,62607004 \times 10^{-34} J.s$
- La constante de Boltzmann : $k = 1,3806488 \times 10^{-23} J.K^{-1}$
- La célérité de la lumière dans le vide : $c = 299792458 m.s^{-1}$
- La longueur d'onde : λ en *mètre*
- La température du corps noir : T en *Kelvin*

Ainsi en considérant qu'une flamme étant assimilable à un corps noir, nous avons commencé par modéliser nous même la loi de Planck sur Scilab à $T=2273$ K.

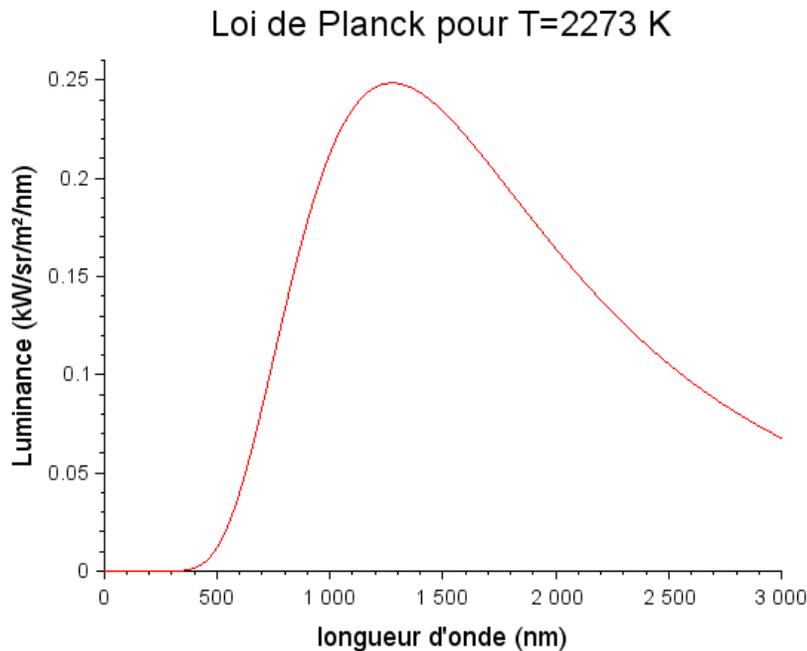


FIGURE 2 – Courbe de la loi de Planck pour un corps noir à 2273 K

Nous obtenons le graphique précédent grace au script disponible en annexe 1.

6 Modélisation de l'émission d'une flamme

6.1 Notion d'émissivité

La flamme n'étant pas un corps noir, son émission n'est donc pas idéale et la loi de Planck ne suffit pas à la modéliser. Il est donc nécessaire d'introduire une nouvelle grandeur appelée l'émissivité (ϵ) pour corriger l'expression de la luminance maximale théorique (L_λ^0) donnée par la loi de Planck. Ainsi, la luminance réelle (L_λ) sera de la forme : $L_\lambda = \epsilon \times L_\lambda^0$. Cette grandeur est propre au milieu étudié et est fonction de la longueur d'onde λ . Dans notre cas, le milieu n'est pas homogène, par conséquent, l'émissivité dépendra aussi de la position dans la flamme. Son expression, pour une tranche dx , est donnée par la relation de Kirchhoff : $\epsilon = k_{abs}dx$.

6.2 Le coefficient d'absorption

Ensuite, il est nécessaire d'explicitier le coefficient d'absorption k_{abs} . Celui-ci est lié aux particules présentes dans le milieu étudié, qui, dans le cas de la flamme sont des agrégats de plusieurs particules de suie dont en voici une représentation :

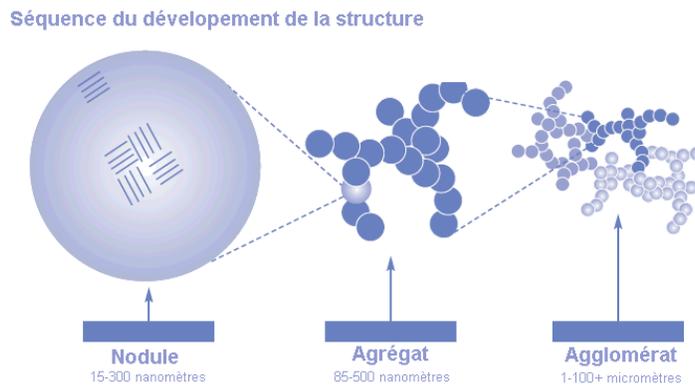


FIGURE 3 – Représentation spatiale des suies (source : http://www.csst.qc.ca/prevention/reptox/Pages/fiche-complete.aspx?no_produit=14043)

Voici les relations qui permettent de calculer k_{abs} :

$$k_{abs} = NC_{abs}$$

avec N la densité d'agrégats (nombre d'agrégats par m^3) et C_{abs} la section efficace d'absorption en m^2 (qui est d'autant plus grande que la particule est capable d'absorber). Pour les agrégats de suie, on peut exprimer cette grandeur ainsi :

$$C_{abs} = N_p C_{abs}^{sph\acute{e}rulle}$$

avec N_p le nombre moyen de sphérules de suie par agrégats et $C_{abs}^{sph\acute{e}rulle}$ la section efficace moyenne d'une sphérule. Etant en présence de diamètres de sphérules très petits devant les longueurs d'onde entrant en jeu ($D_p \ll \lambda$), nous pouvons appliquer le théorème de Rayleigh et obtenir cette expression :

$$C_{abs} = 4\pi \frac{x_p^3}{k^2} E(m)$$

avec $x_p = \frac{\pi D_p}{\lambda}$, le vecteur d'onde $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, et $E(m)$ la capacité d'absorption des suies que nous considérerons constante et égale à 0,3.

Pour résumer, nous obtenons donc :

$$k_{abs}^{agrégats} = N N_p D_p^3 \frac{\pi^2}{\lambda} E(m)$$

Afin de simplifier cette expression, nous remarquons que le volume d'un agrégat s'écrit ainsi $V^{agrégat} = N_p \frac{\pi D_p^3}{6}$ et aussi que $N V^{agrégat} = \frac{V^{agrégat}}{V^{total}} = f_v$ (la fraction volumique en suie). Ces simplifications amènent donc à cette nouvelle expression du coefficient d'absorption :

$$k_{abs}^{agrégats} = 6 \frac{\pi}{\lambda} E(m) f_v$$

6.3 Conclusion

On obtient, pour une tranche d'aérosol d'épaisseur dx :

$$\epsilon = 6 \frac{\pi}{\lambda} E(m) f_v dx$$

et

$$L_\lambda = \epsilon \times L_\lambda^0 = 6 \frac{\pi}{\lambda} E(m) f_v dx \times L_\lambda^0$$

On remarque que dans cette expression, la loi de plank a été divisé par λ ce qui modifie (avec les autres facteurs ajoutés ici) nettement l'allure de la courbe.

Quatrième partie

Problème : Comment mesurer la température d'une flamme ?

7 Méthode de Pyrométrie

Cette méthode se base sur la loi de rayonnement établie par Planck. En effet on mesure ici le rayonnement thermique du gaz. Le flux alors collecté correspond à la luminance de la flamme. On peut donc retrouver la température de la flamme grâce aux expressions de luminance vu précédemment. La méthode repose sur une mesure de luminance à deux longueurs d'onde différentes puis en faisant le rapport des deux valeurs obtenues, il est possible d'en déduire la température de la flamme. Voici le détail des calculs :

$$L_1 = 6\pi E(m) f_v \frac{2hc^2}{\lambda_1^6} \times e^{\left(\frac{-hc}{\lambda_1 kT}\right)}$$

$$L_2 = 6\pi E(m) f_v \frac{2hc^2}{\lambda_2^6} \times e^{\left(\frac{-hc}{\lambda_2 kT}\right)}$$

On en déduit :

$$T = \frac{hc \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)}{k \left(\ln \left(\frac{L_2}{L_1} \right) + 6 \ln \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right) \right)}$$

8 Présentation de l'expérience

Après avoir fait tout un travail de recherche sur les techniques de mesure de température de flamme, ainsi que des études numériques, nous entrons enfin au cœur du sujet : déterminer la température d'une flamme expérimentalement. M.Yon nous a proposé d'effectuer une expérience dans son laboratoire au Coria. Le montage expérimental est constitué d'un brûleur qui consiste juste en un injecteur de gaz avec, à sa sortie, une flamme : lieu de la combustion des gaz et de la formation des suies. Cette flamme est une flamme de diffusion d'éthylène. Un débit de 180 mL/min d'éthylène est injecté au centre du tube, et de l'air est injecté sur le poreux central à 20 lpm (litre par minute) et à 14 lpm sur la couronne extérieure pour stabiliser la flamme. Cette dernière mesure 8 cm. Le brûleur est surmonté d'une hotte pour évacuer les gaz brûlés.

Le rayonnement émis par la flamme passe par un montage optique, présenté en image plus bas. Les distances flamme-lentille1, lentille1-lentille2, et lentille2-spectroscope sont telles que l'image de la flamme se crée sur le capteur de la caméra, après être passé par une fente de 8,3 mm à l'entrée du spectroscope. Ce dernier est un Action SpectraPro SP-2150 et contient un réseau (pour disperser

la lumière) Blazé à 800nm , 150 G/mm . La caméra (PI-MAX4) est dotée d'un capteur CCD.

Un logiciel permet l'acquisition des données collectées par la caméra et nous permet d'analyser la puissance radiative reçue par le capteur. Pour cela nous amplifions le signal ($\times 30$) et l'observons sur un spectre centré à 700nm.

Après nous être familiarisé avec le montage, nous pouvons entamer les mesures. Pour se faire, nous plaçons la flamme le plus haut possible, afin de mesurer la puissance radiative du bas de la flamme (origine). Nous descendons la flamme de 1 cm par mesure et effectuons 8 mesures le long de l'axe de la flamme.

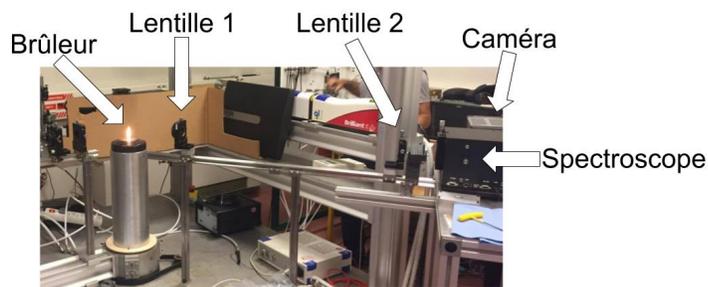


FIGURE 4 – Montage expérimental



FIGURE 5 – Vue du dessus du spectroscope Action SpectraPro SP-2150 et Caméra PI-MAX4

Nous obtenons les profils suivant sur le logiciel :

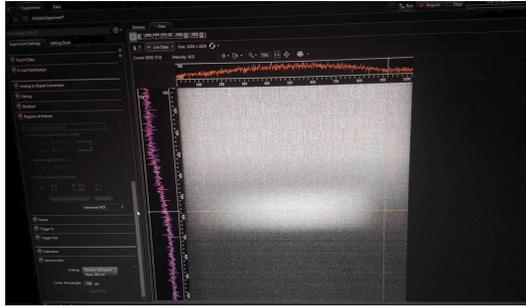


FIGURE 6 – Photographie de l'écran du logiciel avec le profil de puissance radiative mesuré

9 Résultats

A partir de ces profils, nous avons appliqué un programme développé par notre professeur, dont le but est d'intégrer spatialement le profil et de le corriger par une fonction d'appareil. Cette dernière, obtenue par une sphère d'étalonnage (source blanche), permet de réajuster les résultats en prenant en compte la sensibilité et le gain des appareils de mesure. Nous obtenons ainsi le graphique suivant :

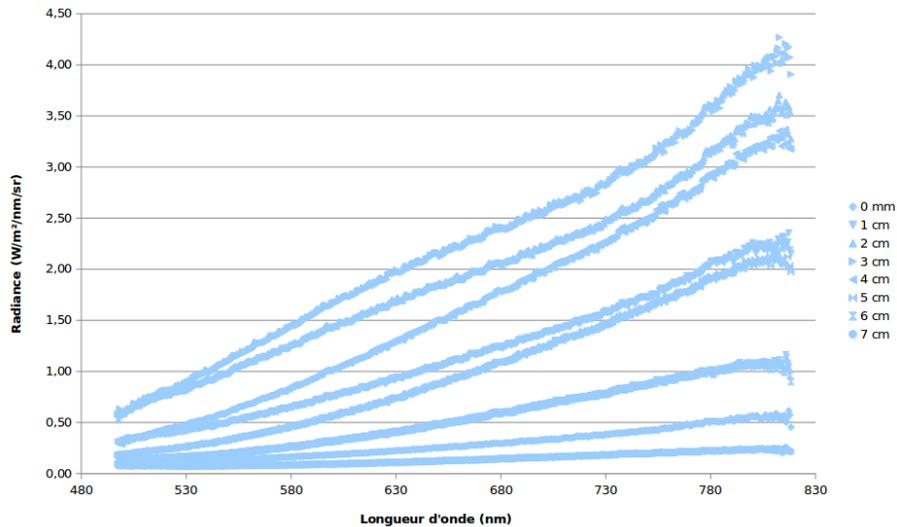


FIGURE 7 – Graphique représentant les puissances radiatives de la flamme en fonction de la longueur d'onde pour des hauteurs données.

Pour interpréter les résultats de l'expérience, on utilise les valeurs de luminance obtenues pour deux valeurs de longueurs d'onde $\lambda_1 = 500nm$ et $\lambda_2 =$

700nm. On obtient à l'aide de la méthode de pyrométrie, décrite précédemment, le graphique suivant (code disponible en annexe 4) :

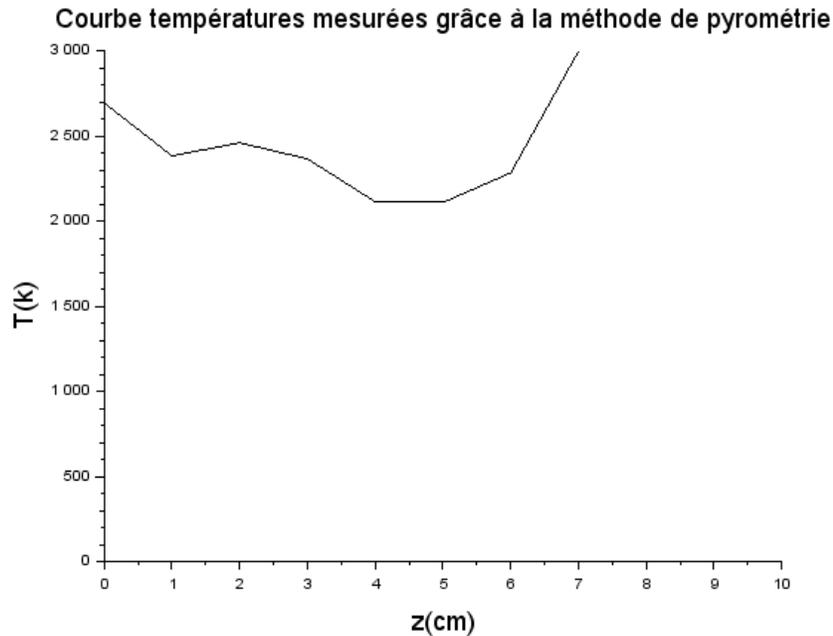


FIGURE 8 – Courbe des températures mesurées grâce à la méthode de pyrométrie en fonction de z pour $\lambda_1 = 500nm$ et $\lambda_2 = 700nm$.

On remarque que les températures représentées sur ce graphique sont plus élevées qu'attendu pour une flamme de diffusion. Nous tenterons de l'expliquer plus loin.

10 Modélisation de la flamme

Le capteur de la caméra reçoit la puissance radiative de toute la largeur de la flamme à une hauteur donnée. Afin d'interpréter les résultats expérimentaux, il faut modéliser la puissance radiative reçue par le spectroscope. On considère la flamme comme un cylindre pour pouvoir étudier les dépendances spatiales de ses caractéristiques.

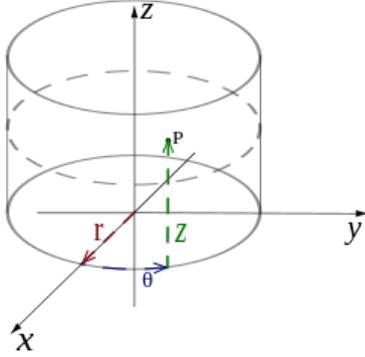


FIGURE 9 – Représentation du modèle cylindrique

D'après les parties précédentes, $L_\lambda = 6\frac{\pi}{\lambda}E(m)f_v dx \times L_\lambda^0$. Donc

$$d^3P = L_\lambda dy dz = 6\frac{\pi}{\lambda}E(m)f_v L_\lambda^0 d^3V$$

avec dans un repère cylindrique $d^3V = r dr d\theta dz$. Il est ensuite nécessaire d'intégrer cette expression sur le volume correspondant au champ de vision du spectroscope. Cependant, les agrégats de suie ne sont pas uniformément répartis dans une flamme et la température n'est pas uniforme. Les grandeurs f_v et L_λ^0 (qui dépend de T) sont donc des fonctions de r et de z ce qui est à prendre en compte dans l'intégrale. Nous exprimons cette puissance en fonction de l'altitude z et sommes seulement sur l'angle θ et le rayon r . Nous faisons aussi le choix d'ignorer les effets d'extinction qu'ont les particules de suies les unes sur les autres. On obtient donc :

$$\begin{aligned} P(z, \lambda) &= \int_r \int_\theta 6\frac{\pi}{\lambda}E(m)f_v L_\lambda^0 r dr d\theta dz \\ &= 12\frac{\pi^2}{\lambda}E(m)dz \int_0^\infty r f_v(r, z) L_\lambda^0(T(r, z)) dr \end{aligned}$$

Afin de terminer ce calcul, il faut donc trouver les expressions des fonctions $f_v(r, z)$ et de $T(r, z)$.

10.1 Modélisation de la fraction volumique en suie

Avant de modéliser la fraction volumique en suie dans une flamme, nous avons cherché des données de référence sur lesquelles s'appuyer. La publication la plus complète que nous avons trouvée est issue de l'Institut Français du Pétrole et contient le graphique suivant :

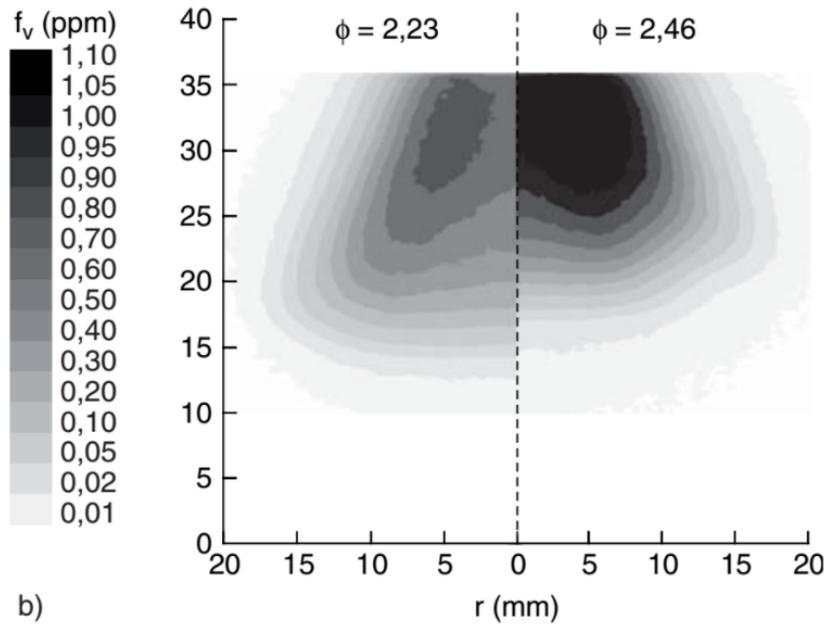


FIGURE 10 – Représentation de f_v en fonction de r et z en mm

Nous avons décidé de modéliser cette distribution spatiale des suies à l'aide d'une gaussienne de la forme $\exp(x^2)$ corrigée à l'aide de 3 paramètres déterminés graphiquement :

$$f_v(r, z) = \gamma \times r^\beta \times e^{-\alpha r^2}$$

α agit sur l'étalement de la cloche en fonction de la hauteur z

β agit sur la position du maximum en fonction de la hauteur z

γ donne la valeur du maximum atteint

voir détails en annexe 2.

Le résultat de notre modélisation est le suivant :

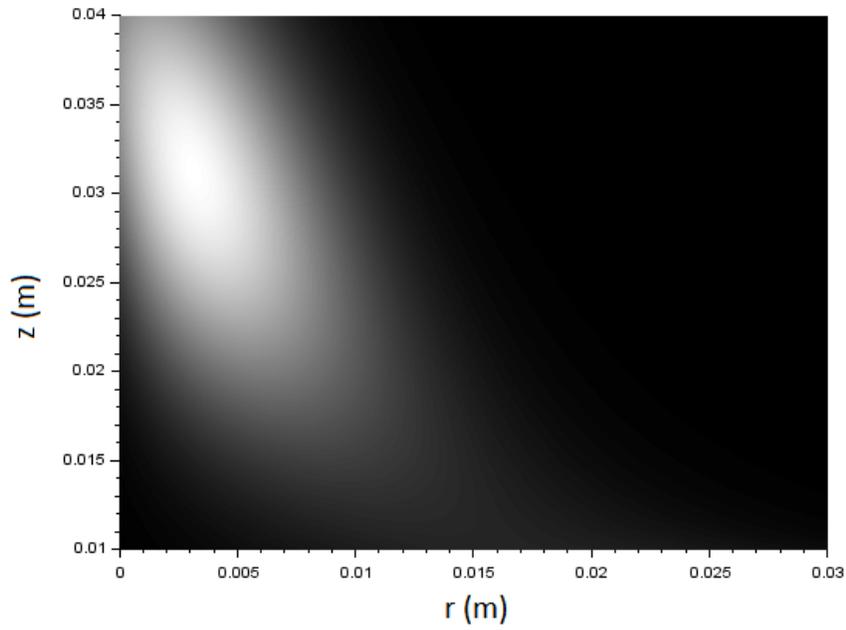


FIGURE 11 – Résultat de notre représentation de f_v en fonction de r et de z en m au sein de la flamme

10.2 Modélisation de la température dans une flamme

Pour modéliser la température de la flamme, nous nous sommes de nouveau basés sur l'étude issue de l'Institut Français du Pétrole.

Nous avons d'abord modélisé la température centrale de la flamme en se basant sur ce graphique :

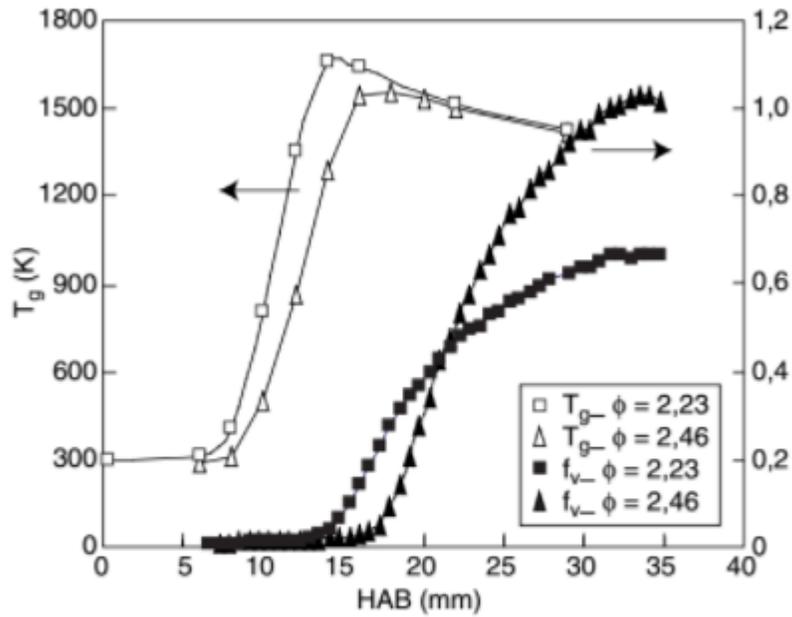


Figure 6

Température des gaz et fraction volumique de la suie le long de l'axe de la flamme (C_3H_6 , 1 bar).

Gas temperature and soot volume fraction along the flame axis (C_3H_6 , 1 bar).

FIGURE 12 – Profil central de la température

Pour la température radiale, nous n'avons pas trouvé de résultats sur sa répartition au sein de la flamme. Nous avons donc conjecturé qu'elle suivait une répartition de la forme $e^{-\alpha r^2}$.

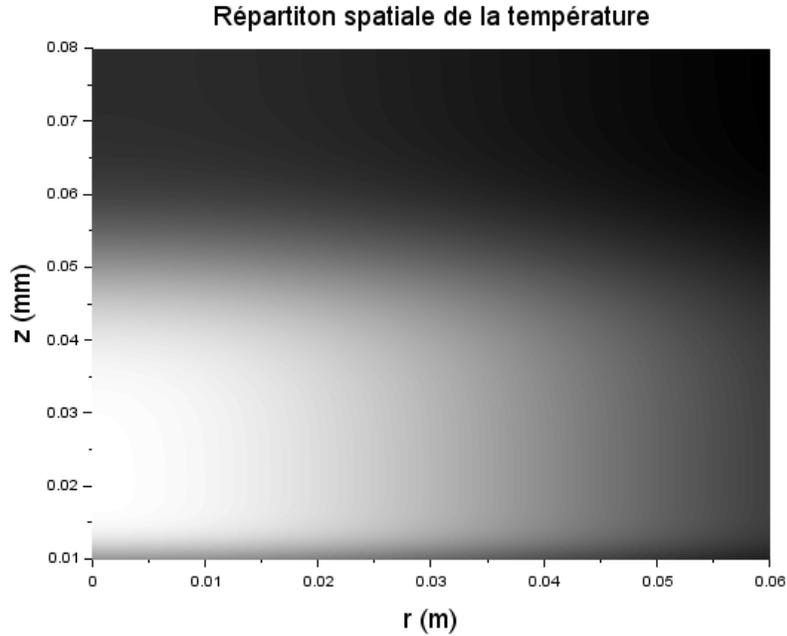


FIGURE 13 – Répartition spatiale de la température au sein de la flamme

Plus la zone est claire, plus la température est élevée.
 Pour plus de détails sur la fonction voir annexe 3.

11 Interprétation et regard critique sur les résultats

On va tenter d'expliquer l'origine de cette surévaluation en comparant la température obtenue par pyrométrie à la température moyenne définie par la fonction $T(r, z)$ déterminée précédemment. Pour obtenir la température moyenne, on procède au calcul suivant :

$$T^{moy} = \frac{\int_r T(r, z) \times f_v(r, z) \times dr}{\int_r f(r, z) \times dr}$$

Ainsi on obtient le graphique suivant :

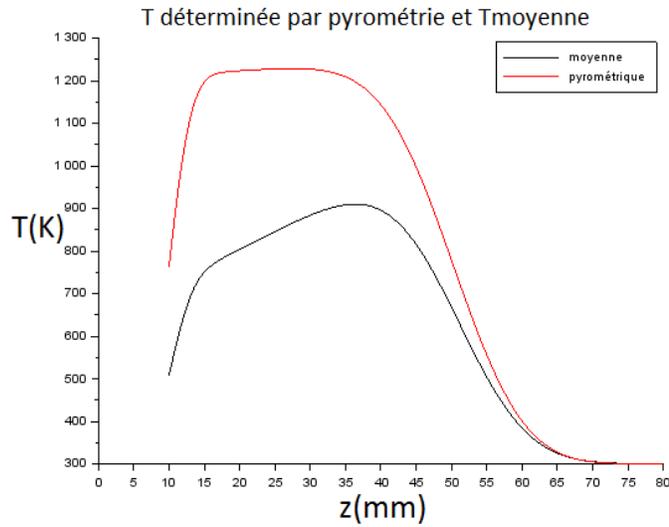


FIGURE 14 – La température déterminée par pyrométrie et la température moyenne au sein d’une flamme en fonction de z en mm

L’écart entre les deux courbes confirme que la méthode de pyrométrie a probablement été la plus grande source d’erreur dans les résultats obtenus dans ce projet. Cependant, il reste à évaluer l’influence du choix des deux longueurs d’onde dans le calcul par pyrométrie.

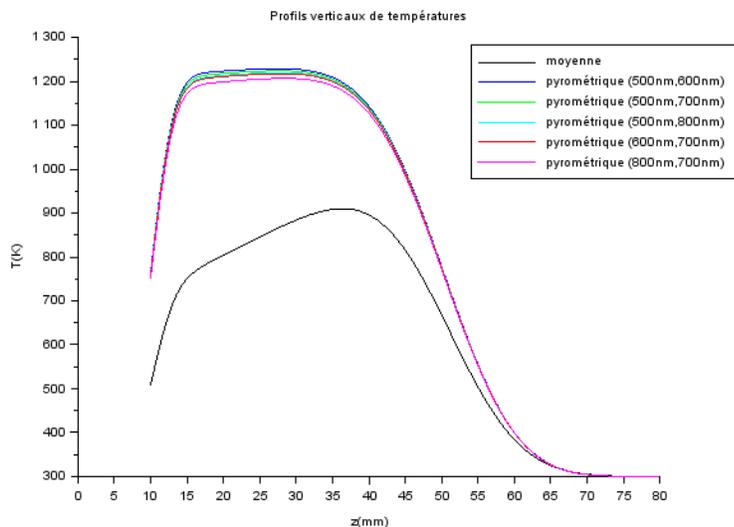


FIGURE 15 – Plusieurs températures déterminées par pyrométrie pour des couples $(\lambda_1; \lambda_2)$ et la température moyenne au sein d’une flamme en fonction de z en mm

On s’aperçoit que le choix des longueurs d’onde n’a qu’une influence infime sur les résultats du calcul par pyrométrie, c’est donc la méthode en elle-même et non le choix des deux longueurs d’onde qui a tendance à surévaluer la valeur réelle de la flamme. Ainsi, la température réelle de la flamme dont on a mesuré la luminescence possède en réalité une température bien inférieure à celle observée grâce à la méthode pyrométrique.

Conclusion

Conclusion sur le travail réalisé

Notre projet avait pour but d’étudier la façon dont la température d’une flamme pouvait être mesurée. Nous avons ainsi dû nous documenter sur les différentes techniques de mesure et nous renseigner sur les phénomènes mis en jeu. Nous nous sommes tournés vers la technique de pyrométrie, méthode optique. Certaines interrogations se sont naturellement posées : l’inhomogénéité des suies pouvait-elle influencer la température de la flamme ? Nous avons ainsi pu nous familiariser avec la notion d’emissivité au sein d’une flamme et de fraction de volume. Le point de départ de notre étude fut apporté par un article scientifique sur la répartition des suies dans la flamme et son profil de température. Nous avons ainsi tenté, par une étude numérique, de décrire la répartition des suies

au sein d'une flamme, et d'en déduire sa puissance radiative émise. Suite à ces études, nous avons pu en déduire un modèle de température de flamme, sous forme numérique toujours. Afin de pouvoir valider notre modèle, nous avons eu l'opportunité de réaliser une expérience sur une flamme d'éthylène en laboratoire et d'en déduire les températures associées.

Conclusions sur l'apport personnel de cet E.C. projet

Nous avons été tous les quatre très intéressés par ce projet. En effet notre professeur a pris ce sujet très à coeur, puisque c'est un de ses domaines d'études. Il a su nous apprendre différents phénomènes physiques complexes autour des flammes et de leurs comportements. Cela a été très enrichissant pour nous de pouvoir en apprendre plus sur le métier de chercheur et d'appréhender quelque peu leurs démarches. Nous avons également eu l'opportunité de réaliser une expérience dans un laboratoire du Coria. Nous nous sommes aperçus de la difficulté de la mise en place d'un modèle numérique et de le vérifier de façon expérimentale. Il n'était néanmoins pas forcément plus aisé de déterminer les mesures expérimentales et de les interpréter. Nous avons pu, au cours de ce projet nous approprier de nouveaux outils, tels que scilab, et nous avons pu apprendre à modéliser différentes fonctions, réaliser différents graphiques. Ce projet fut donc très enrichissant et dense. Nous avons enfin pu mettre en application différentes notions apprises à l'Insa. Nous avons surtout appris beaucoup de nouvelles notions et pu approfondir certaines, en rapport avec le rayonnement, les flammes, les suies, ...

Perspectives pour la poursuite de ce projet

Notre projet fut relativement dense et nous n'avons pas forcément eu le temps d'entreprendre tout ce que nous avions prévu. Nous souhaiterions déjà améliorer la précision de nos résultats et réduire les sources d'erreur, notamment déterminer une gamme de longueur d'onde plus favorable afin de minimiser le taux d'erreur. Nous aurions pu également étudier les autres techniques de mesure de température de flamme et les comparer. De plus on s'est aperçu que les méthodes optiques sont une solution très intéressante pour la mesure de température de flamme, mais il faudrait une meilleure précision pour réaliser des mesures beaucoup plus locales. C'est par exemple le cas des fibres optiques. Cependant il ne faut pas non plus retomber dans les inconvénients des méthodes intrusives.

Sources

<http://www.podcastscience.fm/tag/rayonnement-du-corps-noir/>

https://fr.wikipedia.org/wiki/Max_Planck
https://fr.wikipedia.org/wiki/Loi_de_Rayleigh-Jeans
<https://fr.wikipedia.org/wiki/Temp%C3%A9rature>
https://fr.wikipedia.org/wiki/Thermom%C3%A9trie#Histoire_de_la_thermom.C3.A9trie
<https://www.youtube.com/watch?v=Rs7WkNV8nAA>
<http://www.futura-sciences.com/sciences/dossiers/physique-corps-noir-trous-noirs-743/page/5/>

Annexes

Annexe 1 :

```

function L=Planck(lambda,T)
... L=(2*h*c^2*ones(lambda)./lambda.^5)./(exp(h*c*ones(lambda)./lambda/kb/T)-1)
endfunction

```

Annexe 2 :

```

function fv=Calculfv(r,z)
... beta=1.2-(1.2-0.5)*(z*1E3-20)/(35-20);
... alpha=(30000-15000)*(z*1E3-21)/(35-21)+15000;
... gamma=1;
... fv=gamma.*((r+1E-3).^beta.*exp(-alpha.*r.^2))
endfunction

```

Grâce à cette modélisation, nous réussissons à obtenir une allure de $f_v(r, z)$ mais afin d'obtenir des valeurs correspondant aux valeurs du modèle on procède à une normalisation puis on multiplie par une fonction qui correspond aux valeurs de $f_v(r, z)$ à un rayon proche de 0. On modélise le profil central à partir d'une courbe issue de la même publication utilisée auparavant.

```

function fv=CalculSuperfv(r,z)
... sigma=8E-3;
... pcentral=exp((-0.5*(z-34E-3).^2)/sigma^2);
... fv=Calculfv(r,z)./Calculfv(1E-3,z).*pcentral;
endfunction

```

Annexe 3 :

Nous avons décidé de modéliser cette distribution par le produit de deux fonctions de densité d'une loi normale : ProfilCentralT1 qui modélise l'aspect de la répartition pour les hauteurs les plus faibles et ProfilCentralT2 qui gère la décroissance de la température aux hauteurs plus élevées.

```
1 function T1=ProfilCentral(z)
2     ....zmoy=10E-3;
3     ....sigma=2.5E-3
4     ....ProfilCentralT1=0.5*(erf(zmoy/sigma)+erf((z-zmoy)/sqrt(2)/sigma));
5     ....zmoy=50E-3;
6     ....sigma=8E-3
7     ....ProfilCentralT2=1-0.5*(erf(zmoy/sigma)+erf((z-zmoy)/sqrt(2)/sigma));
8     ....T1 = (1000*(ProfilCentralT1.*ProfilCentralT2)+300)
9 endfunction
```

Les différentes constantes sont déterminées graphiquement pour obtenir l'aspect voulu de la fonction.

Pour la température radiale, nous n'avons pas trouvé de résultats sur sa répartition au sein de la flamme. Nous avons donc conjecturé qu'elle suivait une répartition de la forme e^{-ar^2} .

```
1 function T2=Profilradial(r)
2     ....T2=exp((-0.5*(r).^2)/(3E-3))^2
3 endfunction
```

Grâce à ces deux fonctions, nous obtenons une fonction $T(r, z)$ en faisant leur produit.

Annexe 4 :

```
lambda1 = 500E-9;
lambda2 = 700E-9;
tabz = [0 1 2 3 4 5 6 7]';
P1 = [1.17E-01 3.25E-01 5.91E-01 5.93E-01 3.01E-01 1.90E-01 1.38E-01 7.81E-02]';
P2 = [0.3290971 1.361196 2.223015 2.548086 1.960969 1.244856 0.6720956 0.161135]';
for i=1:8
    ....T(i)=(((log(P2(i)/P1(i))+6*log(lambda2/lambda1))*kb/h/c)^(-1))*(1/lambda1-1/lambda2)
end
plot2d(tabz,T,rect=[0,0,10,3000]);
xlabel('Courbe température moyenne','z (cm)');
ylabel('T (K)');
```