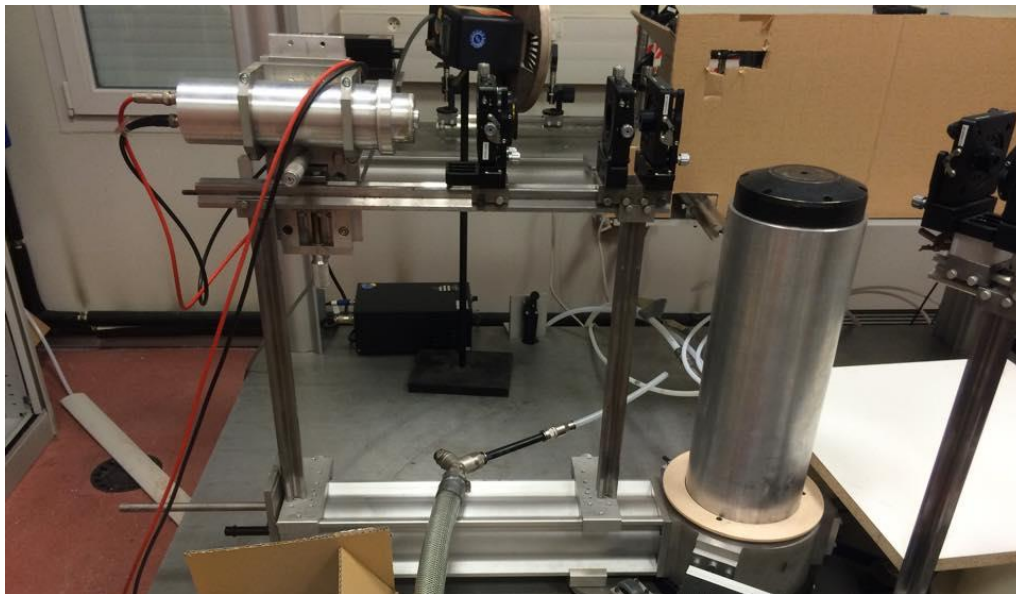


Mesure optique de température de flamme



Etudiants :

Louis BANDIERA

Louis LE FEUVRE

Valérien LOUVET

Charlotte PELLERIN

Yasmine WEHBE

Enseignant-responsable du projet :

Jérôme YON

Date de remise du rapport : 15/06/2015

Référence du projet : **STPI/P6/2015 – n°44**

Intitulé du projet : **Mesure optique de température de flamme**

Type de projet : **Expérimental**

Objectifs du projet:

Le premier objectif de ce projet est d'étudier les différentes méthodes de mesure de température de flamme, en approfondissant nos recherches sur les méthodes optiques.

Le second objectif est de déterminer de manière expérimentale la température d'une flamme issue de la combustion du propane.

Mots-clefs du projet :

- Flamme
- Température
- Planck
- Spectrométrie

TABLE DES MATIERES

1.	Introduction	1
2.	Méthodologie et organisation du travail	2
3.	Présentation des méthodes de mesure	3
3.1.	Méthodes de mesure intrusives	3
3.2.	Méthodes optiques.....	4
3.2.1.	Partie théorique : rayonnement et loi de Planck.....	4
3.2.2.	familles de pyromètres et analyse comparative.....	6
4.	Travail réalisé et résultats	9
4.1.	Environnement expérimental.....	9
4.1.1.	Montage expérimental	9
4.1.2.	Spectrométrie : principe et boîtier d'acquisition MAYA	9
4.2.	Traitements des résultats et analyse.....	10
4.2.1.	Utilisation du logiciel SciLab.....	10
4.2.2.	Détermination de la température : méthode des moindres carrés	10
4.2.3.	Détermination de l'intervalle de longueurs d'onde adapté	11
4.2.4.	Présentation et analyse des résultats	13
4.2.5.	Influence de l'inhomogénéité de la flamme sur les résultats	14
5.	Conclusions et perspectives.....	19
6.	Bibliographie	21
	Table des illustrations	22
	Table des tableaux	22
	Annexes.....	23
6.1.	Listing des programmes réalisés.....	23
6.2.	Schéma du montage	26
6.3.	Explications supplémentaires sur les pyromètres	26

1. INTRODUCTION

Le projet P6 se déroule au cours du semestre 4 du cycle STPI. Il a pour thème, l'étude de la flamme émise par la combustion du propane et a pour objectif final la détermination de la température de cette flamme.

Ce projet a été proposé par Jérôme YON, professeur à l'INSA Rouen et chercheur au laboratoire CORIA. Ses recherches concernent en grande partie les suies. Or les recherches sur les particules de suies formées dans les régions réactives de la flamme ont permis de mettre en évidence leur nature néfaste pour l'environnement et l'Homme.

L'intérêt de notre projet est donc de déterminer la température de flamme issue de la combustion du propane. Cette étude est effectuée en divers points de la flamme. Ainsi, la connaissance de la température de la flamme permet par la suite de déterminer la température d'évaporation des suies en tout point de cette flamme.

La combustion est utilisée dans de nombreux domaines, notamment dans les transports. Une telle étude peut, par exemple, contribuer à l'amélioration ou l'élaboration de moteurs émettant moins de particules fines. La connaissance de température de flamme peut également être utilisée dans la modélisation des incendies.

L'objectif de ce projet est pour nous, de mieux comprendre les méthodes optiques de mesure de température de flamme et d'effectuer des analyses et modélisations de résultats expérimentaux.

La mesure de la température dans les flammes se révèle assez complexe. Deux méthodes de mesure existent : les méthodes intrusives et les méthodes optiques.

Les techniques de mesures intrusives sont basées sur l'utilisation de sondes et de capteurs en contact direct avec le milieu où est réalisée la mesure. Cependant, ces techniques possèdent des inconvénients.

Tandis que les techniques optiques non intrusives permettent l'exploration et l'analyse des milieux réactifs sans perturbation. C'est une de ces méthodes que nous avons choisi, puisque nous utiliserons la méthode optique et plus précisément l'étude spectrale de la flamme grâce à la loi de Planck et à la spectrométrie.

Dans ce rapport, nous commencerons par donner quelques notions indispensables pour notre projet concernant le rayonnement, avec la loi de Planck et la spectrométrie. Puis nous présenterons rapidement les différentes techniques de mesure de température de flamme. Nous parlerons ensuite des différentes familles de pyromètres au travers d'une analyse comparative des pyromètres existant sur le marché. Finalement nous décrirons le travail effectué depuis le montage jusqu'à la détermination de la température de flamme en passant par l'analyse des résultats.

2. METHODOLOGIE ET ORGANISATION DU TRAVAIL

Notre groupe compte cinq personnes. Après la présentation du projet par M.YON, nous avons entrepris des recherches personnelles sur le sujet (rayonnement, loi de Planck, pyrométrie). Ceci nous a permis d'avoir les connaissances nécessaires ainsi qu'un bon aperçu du problème avant de commencer réellement le projet.

Notre travail pour ce projet se décompose en deux parties : une partie théorique sur le rayonnement, la loi de Planck, les méthodes de mesure et une partie exploitation et analyse des résultats expérimentaux obtenus par M.YON.

Pour être plus efficace nous avons défini nos rôles au sein du groupe en fonction des préférences et capacités de chacun:

- Les recherches documentaires pour la partie théorique du rapport ont été effectuées par Louis B. et Valérian.
- La partie exploitation des résultats a été prise en charge par Yasmine, Charlotte et Louis. Cette partie consiste en l'écriture d'un programme pour déterminer la température de flamme et d'un programme pour vérifier l'influence de l'inhomogénéité d'une flamme sur les résultats obtenus par le premier programme. L'analyse finale des résultats a été effectuée par Yasmine, Louis et Charlotte.
- La rédaction du rapport est un travail collectif.

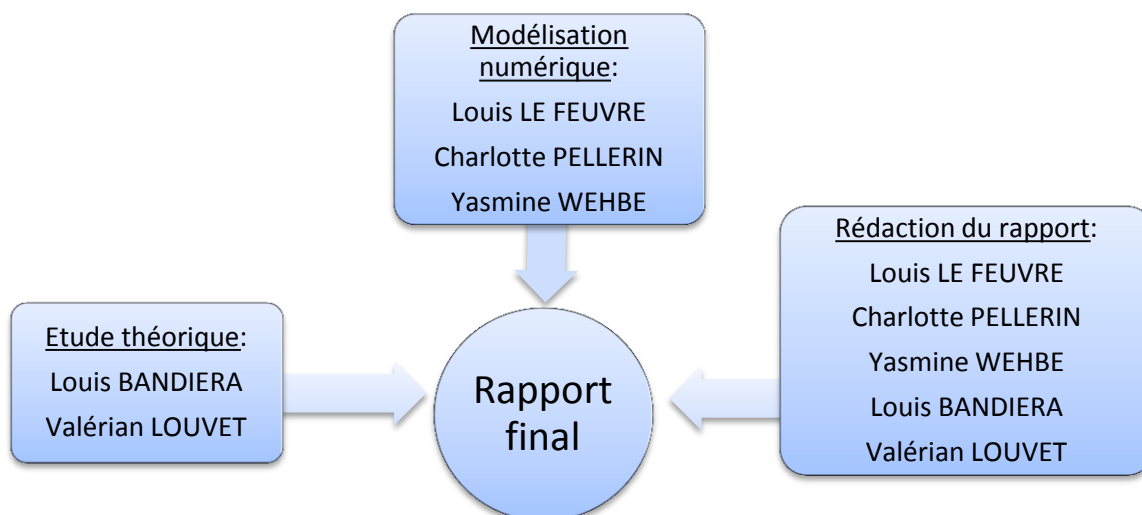


FIGURE 1: ORGANIGRAMME DES TACHES ET DES ETUDIANTS CONCERNES

En ce qui concerne l'accès aux données, nous avons créé une plateforme de partage de fichiers (oneDrive) afin que tous les membres du groupe puissent publier leurs documents.

Pour garder une trace du travail effectué à chaque séance et suivre l'avancement de notre projet, nous avons pris l'habitude de rédiger un compte-rendu de la séance et de déterminer les objectifs et le travail à faire pour la séance suivante. Un bilan était effectué à



chaque début de séance avec M.YON pour définir les nouvelles pistes à suivre et revoir les points qui pouvaient nous poser problème.

Ce travail permet donc de se familiariser avec la conduite d'un projet. Il nous apprend à gérer un travail en groupe avec l'organisation, la répartition des tâches, le respect des délais et la communication.

3. PRESENTATION DES METHODES DE MESURE

3.1. METHODES DE MESURE INTRUSIVES

Pour mesurer la température d'un corps, on pense directement à employer des méthodes intrusives. En effet, elles se caractérisent par une facilité relative d'utilisation, de mise en place et d'interprétations des résultats.

Le principe est intuitif : il s'agit d'introduire dans le milieu à étudier un appareil qui enregistrera des valeurs que l'on pourra exploiter à l'aide de formules physiques particulières, afin d'obtenir des résultats.

Il existe diverses méthodes intrusives, plus ou moins adaptées aux différentes gammes de température. Les appareils de mesure de températures élevées peuvent être regroupés sous les catégories suivantes :

- Les sondes et pyromètres à aspiration, qui prélèvent directement la température dans l'élément d'étude.
- Les thermocouples qui mesurent une différence de potentiel entre une source dans le milieu d'étude et une autre source dans un milieu à température connue.
- Les sondes et thermocouples à couche mince qui utilisent les propriétés de variation de résistivité électrique selon la température
- Les sondes à fibre optique qui enregistrent les températures de manière déportée, pour pouvoir les calculer à l'aide de formules comme la diffusion de Raman ou la loi de Planck.
- Les thermomètres à ultrasons qui utilisent l'équation de Newton-Laplace, qui traite de la dépendance de la vitesse de propagation du son en fonction de la température du milieu.

Tableau récapitulatif

Méthodes	Coût	Facilité de mise en œuvre	Gamme de température	Adaptation	Précision des mesures/Intrusivité
Aspiration	+++	++++	++++	+	+
Thermocouples	++++	+++	+++	+	+
Couche mince	+	+	+++	+++	++
Fibre optique	+	++	+	+++	++
Ultrasons	+	+++	+++	++++	+

++++ : excellent

+++ : bon

++ : correct

+ : mauvais



Les méthodes intrusives possèdent cependant des inconvénients :

- D'une part, par leur définition. En effet, une méthode intrusive revient à introduire un corps externe dans le milieu pour la mesure. Cela implique donc une perturbation plus ou moins conséquente du milieu étudié, qui risque de fausser les résultats.
- D'autre part, les machines utilisables dans les gammes de températures élevées (de l'ordre de 2000°C) sont rares et fonctionnent souvent à leur limite d'utilisation. De plus, les mesures enregistrées possèdent des marges d'incertitude difficilement négligeables, car les formules exploitées sont approximées pour faciliter les calculs.

3.2. METHODES OPTIQUES

3.2.1. PARTIE THEORIQUE : RAYONNEMENT ET LOI DE PLANCK

- **RAYONNEMENT**

Il existe plusieurs types de rayonnement. La définition générale de ce terme est, d'après le site Futura-sciences : « Synonyme de radiation. Ensemble d'ondes électromagnétiques ou de particules chargées d'énergie. Certains rayons sont capables de traverser la matière ».

Dans ce projet, le rayonnement qui nous intéresse et qui nous permettra de résoudre notre problème est le rayonnement thermique. Il se caractérise par un échange d'ondes électromagnétiques. Nous expliquerons donc son fonctionnement général afin de mieux aborder la suite du problème.

Tout d'abord, lors d'un rayonnement thermique, le milieu intermédiaire ne participe pas forcément à l'échange électromagnétique qui a lieu. Ainsi, le soleil est capable de chauffer la terre alors que l'onde électromagnétique responsable de ce réchauffement passe par l'espace, un milieu bien plus froid que la température de la terre ou du soleil.

Pendant un tel échange, on peut distinguer 3 étapes principales :

- Émission : L'énergie partant de la source de chaleur est convertie en énergie électromagnétique.
- Transmission : Les ondes se propagent dans le milieu intermédiaire (qui peut parfois en absorber une partie).
- Réception : Lorsque les ondes arrivent à l'objet récepteur, elles sont de nouveau converties en énergie thermique.

Il existe deux types de rayonnement :

- Le rayonnement par incandescence : Tous les corps à plus de 0K émettent ce type de rayonnement puisqu'il est dû à l'agitation thermique des atomes et des molécules (les



atomes ne bougeant plus à 0 K, un objet à cette température n'émettra aucun rayonnement.). On en déduit donc que la température aura un effet sur ce rayonnement.

- Le rayonnement par luminescence : Les atomes sont encore une fois excités par un autre facteur que la température. On peut citer comme un exemple de ce rayonnement les lasers. On remarque d'ailleurs que leur fonctionnement est très différent d'une ampoule classique puisqu'un laser a une direction précise et une seule longueur d'onde, contrairement à une ampoule classique qui émet dans toutes les directions et sur presque toutes les longueurs d'ondes du visible.

On remarque que dans les deux cas, c'est l'excitation des atomes qui est l'origine du rayonnement. Cela vient du fait que c'est une transition électronique entre deux états d'énergie qui provoque ce rayonnement.

- **CORPS NOIR**

« Le corps noir est par définition un corps absorbant intégralement les radiations qu'il reçoit. Dans ces conditions, le flux réfléchi est nul et le flux partant est seulement constitué du flux émis. »¹. Le corps noir est un objet idéal dont on peut se rapprocher à l'aide d'une cavité aux parois opaques et isothermes qu'on peut considérer comme absorbant tous les rayonnements reçus.

- **LOI DE PLANCK**

La loi de Planck est une loi permettant de trouver la luminance du corps noir en fonction de la température du corps.

eq 1.
$$L_{\lambda,T}^0 = \frac{C_1}{\lambda^5} (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)^{-1}$$

$$C_1 = 2 \cdot h \cdot \left(\frac{c_0}{n}\right)^2 \approx 1.19 \cdot 10^8 W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-4}$$

$$C_2 = \frac{h \cdot c_0}{k_B \cdot n} \approx 14\,400 \mu m \cdot K$$

h : constante de Planck

n : indice optique

c₀ : vitesse de la lumière dans le vide

k_B : constante de Boltzmann : $1.3806488 \cdot 10^{-23} m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$

On comprend alors le comportement de certains objets lorsqu'ils sont chauffés : au fur et à mesure qu'ils chauffent, le pic des longueurs d'ondes présentes se déplace, pour avancer petit à petit dans le domaine du visible en passant par des étapes où l'objet sera rouge, orange puis jaune. C'est lorsque ce pic est entièrement dans le visible que l'objet devient blanc.

¹ Source : définition du site internet planet-terre, ens-lyon



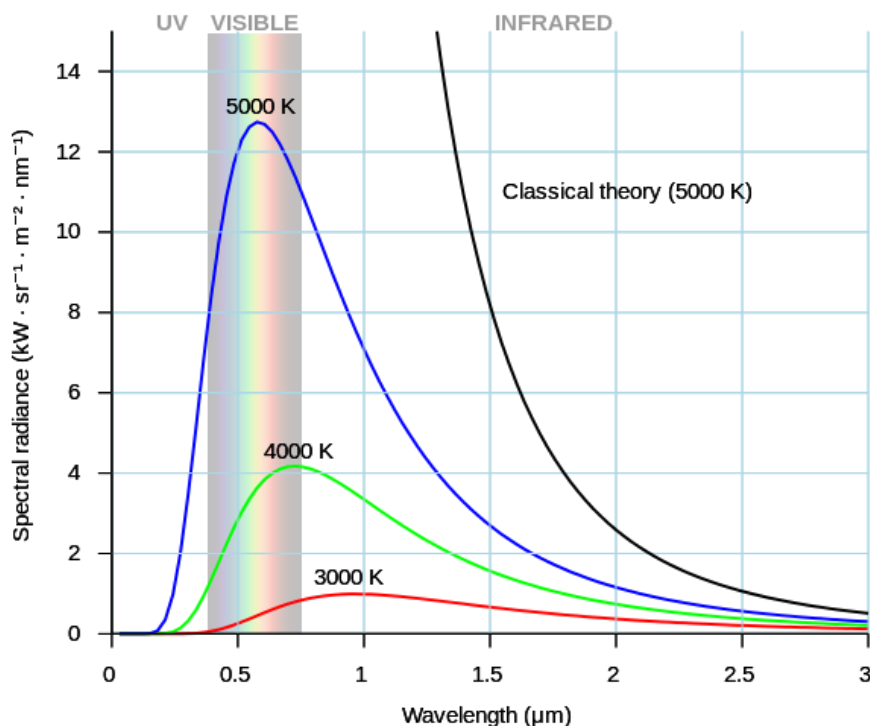


FIGURE 2: LOI DE PLANCK (COURBES COLOREES) DEVRIVANT L'EMISSION ENERGETIQUE DU CORPS NOIR A DIFFERENTES TEMPERATURES

Source : Wikipédia, loi de Planck

Cette loi sera très importante dans la suite du projet puisque nous chercherons la température de la flamme à partir de cette courbe. Cependant, les suies qui se situent dans la flamme ne peuvent pas être considérées comme des corps noir : ce sont des corps gris. Il faudra donc multiplier la loi de Planck par l'émissivité des suies afin d'analyser correctement nos résultats.

- **EMISSIVITE**

L'émissivité correspond au rapport entre la luminance du corps de température T étudié et celle du corps noir rayonnant à la même température.

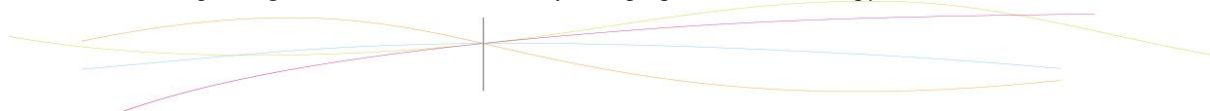
eq 2.
$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{L_{\lambda}}{L_{\lambda,T}^0}$$

3.2.2. FAMILLES DE PYROMETRES ET ANALYSE COMPARATIVE

Un pyromètre est « un dispositif sans contact collectant une partie de la radiation thermique émise par un objet, afin de déterminer sa température de surface »².

Les pyromètres ponctuels à fibre optique captent le rayonnement émis par un corps, pour en déterminer sa température. On peut éventuellement utiliser une lentille convergente pour canaliser le rayon de la fibre optique vers le corps chaud en une zone plus précise.

² Source : Techniques ingénieur : « thermomètres à fibre optique sans contact : pyromètres »



Cependant, l'utilisation de la fibre optique présente des limites. En effet, la fibre optique transmet les longueurs d'onde dans les infrarouges (IR) mais est vite limitée pour les longueurs d'onde plus grandes. Ainsi le signal émis par le corps chaud est haché et difficilement exploitable. D'après la loi de Wien, plus les températures sont basses, plus la fibre optique est imprécise. Effectivement, elle joue le rôle d'un filtre spectral passe-bas, c'est à dire qu'elle ne fait passer que les basses longueurs d'onde. Ainsi, le type de fibre optique utilisé impacte directement la quantité de débit de rayonnement IR capté et la résolution de la mesure de la température.

Voici les principales catégories de pyromètres (*voir les schémas dans les annexes pour plus de détails*) :

- **PYROMETRE A RADIATION TOTALE A FIBRE OPTIQUE**

Ce pyromètre utilise la loi de Stefan-Boltzmann :

eq 3.
$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

σ : constante de Stefan-Boltzmann

ε : l'émissivité de la cible à λ

T : la température

Il capte le spectre dans sa totalité grâce à des détecteurs thermiques. Il est assez simple et peu cher. Mais sa sensibilité est assez faible car la gamme de mesure est assez basse : de -100 à 600°C avec une incertitude de l'ordre de 10°C, car ce type pyromètre effectue de nombreuses corrections. Il est donc peu précis pour les mesures dont nous avons besoin pour ce projet. De plus, ce pyromètre est influencé par l'absorption de certaines molécules comme le CO₂ ou H₂O.

L'usage d'une fibre optique diminue la précision des mesures. La fibre optique est plutôt destinée à préciser les résultats des pyromètres monochromatiques et bichromatiques expliqués plus loin dans le rapport.

- **PYROMETRE BASSE TEMPERATURE**

Le pyromètre basse température se rapproche du pyromètre à radiation totale mais est beaucoup plus coûteux. Avec un tel pyromètre, c'est-à-dire destiné à mesurer les basses températures, la sensibilité doit être élevée dans l'infrarouge moyen (3-50 μm). Le pyromètre basse température ne peut pas mesurer des températures très élevées, ce qui nuit à son efficacité. Il est donc peu précis.

- **PYROMETRE MONOCHROMATIQUE A FIBRE OPTIQUE**

Le pyromètre monochromatique est plus précis que le pyromètre à radiation totale dans ses mesures. Il utilise la loi de Planck et exprime la distribution spectrale du rayonnement thermique en fonction de la température. Plus simplement, il utilise la luminance monochromatique. Sur une bande spectrale très étroite, le pyromètre emploie ses capteurs quantiques et thermiques pour mesurer respectivement les hautes et basses températures. Cependant, l'impact de la poussière dans l'appareil nuit à sa précision à plus



ou moins long terme. Les gammes de mesures sont également assez restreintes : de la température ambiante à environ 500°C, pour des longueurs d'onde très précises.

Les fibres optiques permettent d'isoler le flux IR depuis le corps mesuré jusqu'au détecteur. Cela permet de diminuer les perturbations de l'environnement.

- **PYROMETRE BICHROMATIQUE (OU PLUS GÉNÉRALEMENT MULTICHROMATIQUE) A FIBRE OPTIQUE**

Quand l'énergie qui atteint le pyromètre n'est pas assez puissante, il faut 2 ou plusieurs bandes spectrales pour mesurer précisément la température du corps. Ces deux bandes spectrales sont tellement étroites qu'on peut assimiler à des bandes monochromatiques centrées sur deux longueurs d'onde λ_1 et λ_2 . Néanmoins, il ne faut pas qu'elles soient trop éloignées l'une de l'autre, pour que le facteur d'émissivité reste inchangé.

Ce pyromètre dit différentiel peut être considéré comme un double pyromètre monochromatique.

La gamme de mesure va de 700 à 3 000°C avec une précision d'environ 1% sans correction. L'avantage de ce type de pyromètre est qu'il ne fait pas de correction (due à l'émissivité) car l'influence des perturbations sur les mesures est faible. L'inconvénient est qu'il est très coûteux.

- **PYROMETRE PHOTOTHERMIQUE IMPULSIONNEL**

Un laser émet un rayonnement sous la forme d'impulsions sur l'objet dont on souhaite connaître la température. Cela chauffe l'objet et crée une variation de température. Cette variation de température est analysée par IR. L'avantage de cette méthode est de supprimer l'influence de l'environnement sur la précision de mesure.

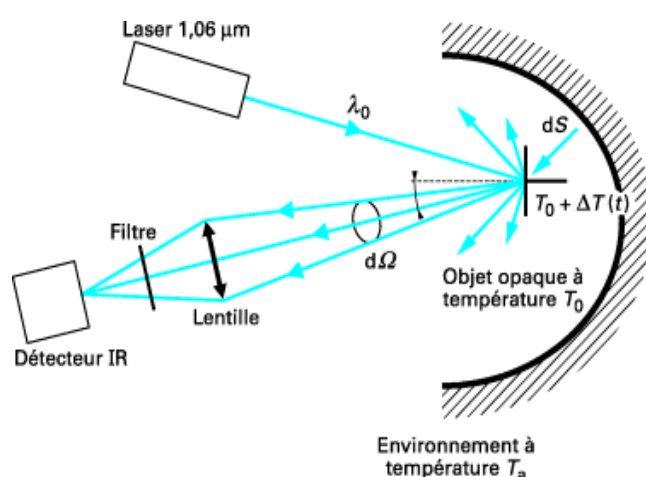


FIGURE 3: PRINCIPE DE LA SPECTROMÉTRIE PHOTOTHERMIQUE IMPULSIONNELLE

Pour un pyromètre dit de série compacte, les prix sont environ de 500€, mais pour les pyromètres de hautes performances, on peut compter au moins 1000€.



4. TRAVAIL REALISE ET RESULTATS

4.1. ENVIRONNEMENT EXPERIMENTAL

4.1.1. MONTAGE EXPERIMENTAL

L'expérience réalisée afin d'obtenir les mesures nécessaires à la détermination de la température de la flamme a été effectuée à l'aide d'un spectromètre MAYA. (Voir le schéma du montage en annexe)



FIGURE 4: SPECTROMETRE MAYA AU CORIA

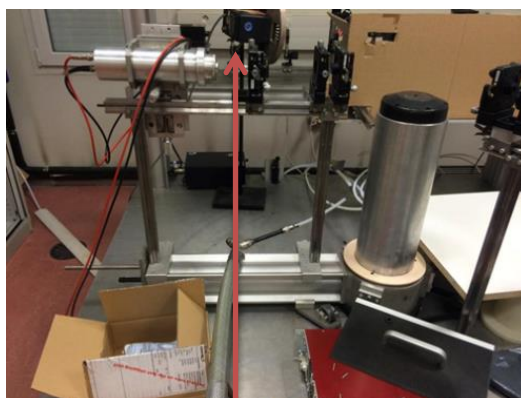


FIGURE 5: MONTAGE EXPERIMENTAL



FIGURE 6: GENERATEUR DE FLAMME

Le spectromètre sera installé ici
La lumière arrive vers la lentille et est ensuite réfléchi.

4.1.2. SPECTROMETRIE : PRINCIPE ET BOITIER D'ACQUISITION MAYA

La spectrométrie est l'étude du spectre émis par un phénomène physique. Elle étudie les rayonnements diffusés, émus ou absorbés par une substance et sa décomposition sur une échelle d'intensité lumineuse. Le spectroscopie est l'instrument permettant de disperser la lumière en fonction de la longueur d'onde.

Le spectroscopie utilisé par M.YON pour ses recherches est le MAYA 2000 pro d'Ocean Optics. Il couvre les longueurs d'onde dans l'intervalle 165-1100 nm.



Le capteur mesure les émissions du corps étudié, placé devant lui. La lumière est dirigée dans le spectromètre par la fibre optique au niveau de l'entrée (1) et passe au travers d'une fente (2) qui permet de définir la largeur du faisceau. La pièce (4) collimate le faisceau lumineux en une seule direction de propagation. Il est ensuite diffracté par la pièce (5), puis renvoyé sur le détecteur (7). L'énergie est enfin transformée en signal électrique.

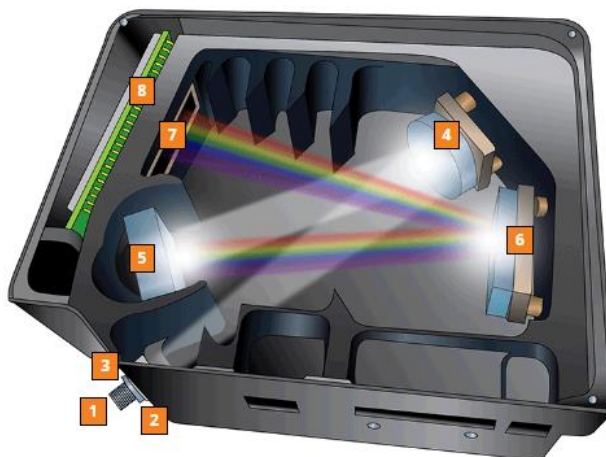


FIGURE 7: INTERIEUR DU BOITIER MAYA

4.2. TRAITEMENTS DES RESULTATS ET ANALYSE

4.2.1. UTILISATION DU LOGICIEL SCI-LAB

Pour effectuer la partie exploitation des résultats, avec l'écriture de deux programmes, nous avons utilisé le logiciel SciLab. Ce logiciel possède un langage de programmation propre ainsi que des fonctions prédéfinies et la possibilité de visualiser des graphiques.

Nous avons donc choisi d'utiliser ce logiciel car il est plus adapté à notre type de travail qu'un tableur, notamment pour les régressions non linéaires.

(Les programmes seront explicités plus tard dans le rapport).

4.2.2. DETERMINATION DE LA TEMPERATURE : METHODE DES MOINDRES CARRES

L'exploitation des données obtenues à l'aide du boîtier MAYA a été découpée en plusieurs étapes :

- Traitements des données brutes.
- Ecriture du programme.
- Exploitation à l'aide du programme.

• FONCTION LEASTSQ ET PRINCIPE DU PROGRAMME

La détermination de la température à l'aide du programme repose sur une régression non-linéaire au sens des moindres carrés. Cette analyse s'appuie sur l'usage de la loi de Planck et de la fonction SciLab « leastsq ». L'objectif est de trouver le meilleur « fit » aux courbes expérimentales obtenues pour chaque hauteur dans la flamme (0.5 ; 1 ; 1.5 ; 2 ; 2.5 ; 3 ; 3.5 ; 4 et 4.5 cm).



Une telle méthode repose sur la comparaison des données expérimentales avec le modèle théorique, ici la loi de Planck. Les suies ne sont pas des corps noirs, par conséquent il faut multiplier la loi de Planck par l'émissivité spectrique de la suie.

L'émissivité spectrique dépend des propriétés optiques des suies $E(\lambda)$, de la fraction de volume de suies fv et de la profondeur considérée du milieu qui émet dx . Ainsi plus le milieu contient des suies, plus le rayonnement est important.

$$\text{eq 4.} \quad \varepsilon_{\lambda} = \frac{6\pi E(\lambda)fv \cdot dx}{\lambda}$$

Pour le programme on pose donc :

$$\text{eq 5.} \quad S_{\lambda} = fact \cdot \frac{L_{\lambda,T}^0}{\lambda}$$

Où S_{λ} correspond au signal enregistré.

Le facteur multiplicateur (fact) est donc :

$$\text{eq 6.} \quad fact = A \cdot 6\pi E(\lambda)fv \cdot dx$$

Où A correspond au facteur de conversion.

Le but final est de définir deux paramètres : la température de flamme et le facteur multiplicateur de la loi de Planck.

Pour faire correspondre ces deux paramètres aux données expérimentales on essaie de minimiser la distance entre le modèle théorique et la courbe expérimentale. La fonction SciLab « leastsq » est utile pour notre programme car elle tend à minimiser la somme du carré de la différence entre chaque point expérimental et théorique.

(Voir le programme dans son intégralité en annexe)

La fonction « leastsq » nécessite une approximation de la solution. Pour cela, nous avons fait des recherches sur les gammes de températures de flamme afin de rentrer dans le programme des données cohérentes.

4.2.3. DETERMINATION DE L'INTERVALLE DE LONGUEURS D'ONDE ADAPTE

Nous avons constaté que le programme donnait des résultats différents et un fit plus ou moins correct en fonction de l'intervalle de longueurs d'onde choisie. Pour remédier à cela nous avons effectué une étude sur différentes longueurs d'onde afin de déterminer le meilleur intervalle d'étude.



Dans un premier temps, à l'aide des courbes expérimentales nous avons déterminé l'intervalle de longueur d'onde le plus facile à « fitter » pour toutes les hauteurs de la flamme (pas trop de bruits). Nous avons donc choisi la gamme 500-700 nm. Sur cette gamme de longueur d'onde pour les hauteurs extrêmes (0.5 cm et 4.5 cm) nous avons déterminé la somme des valeurs absolues des écarts entre le tracé expérimental et le modèle théorique (avec un delta de 10 nm). Cette étude nous a permis d'aboutir au graphique suivant :

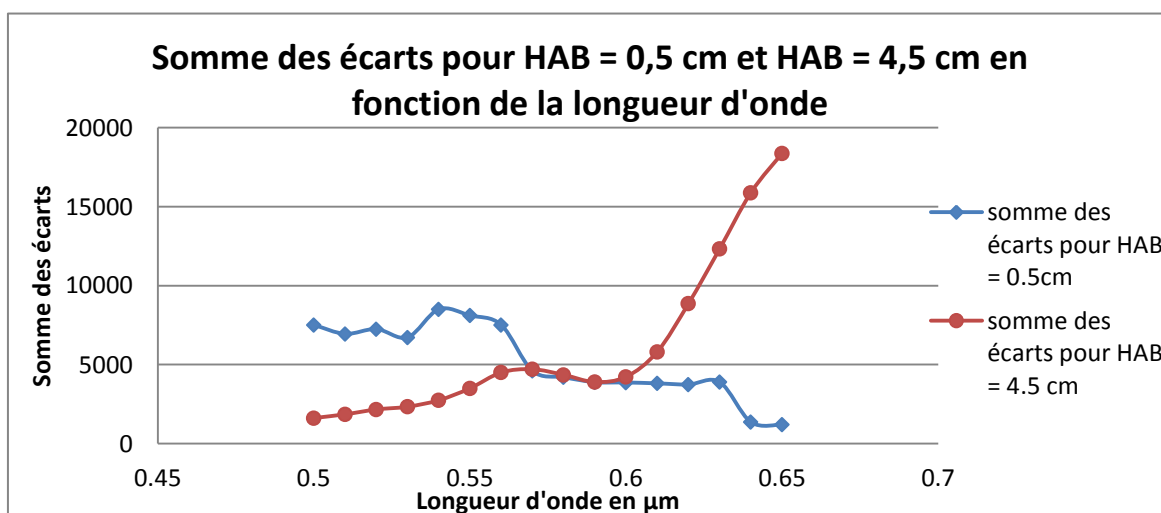


FIGURE 8: GRAPHIQUE DE LA SOMME DES ECARTS EN FONCTION DE LA LONGUEUR D'ONDE

Comme le montre le graphique, l'intersection des deux courbes correspond à la meilleure longueur d'onde d'étude. Nous avons donc choisi d'effectuer notre analyse autour de la longueur d'onde 590 nm.

Nous devons maintenant discuter de la largeur de l'intervalle de longueur d'onde centré en 590 nm. Pour cela nous avons fait varier cette largeur entre 70 nm et 200 nm. Pour déterminer la meilleure largeur d'étude nous avons fait la somme des erreurs sur toutes les hauteurs et pondéré par la largeur de l'intervalle. Nous avons obtenu les résultats suivant :

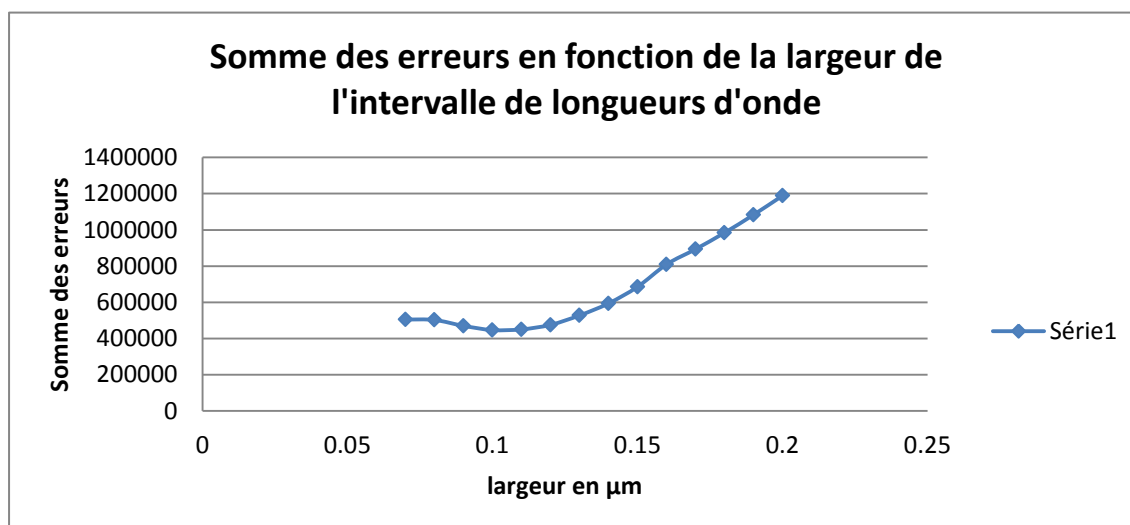


FIGURE 9: GRAPHIQUE DE LA SOMME DES ERREURS EN FONCTION DE LA LARGEUR DE L'INTERVALLE DE LONGUEURS D'ONDE

Avec le graphique nous pouvons conclure qu'il faut effectuer l'analyse avec un delta de 100nm c'est-à-dire entre 540 et 640 nm.

- **Exemple de «fittage » :**

La courbe expérimentale est tracé en bleue et le modèle défini par le programme est représenté en noir.

On étudie la flamme à une hauteur (HAB) de 4 cm et sur l'intervalle $\lambda = 0.54-0.64\mu\text{m}$. Les résultats obtenu sont : $T = 1832.38\text{ K}$ et $\text{fact} = 0.75$.

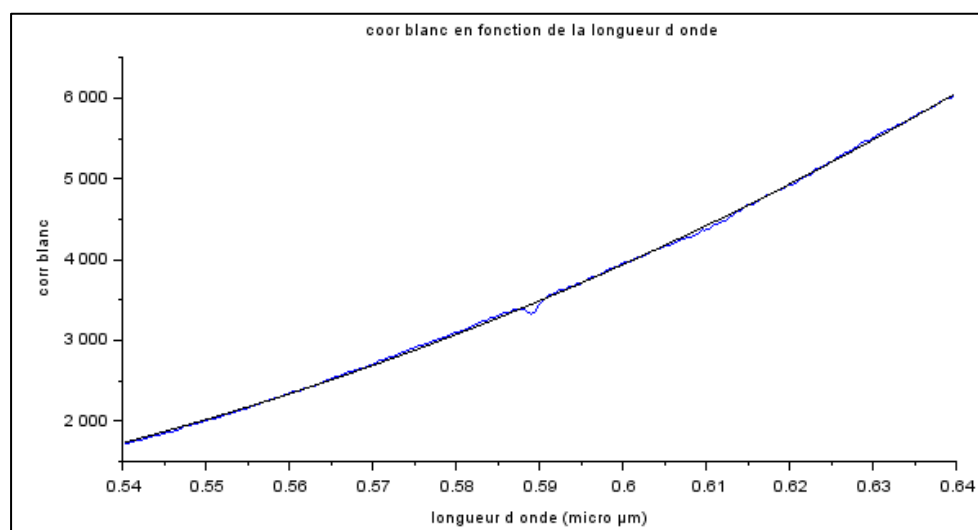


FIGURE 10: FITTAGEPOUR UNE HAUTEUR DANS LA FLAMME A 4 CM

4.2.4. PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS

- **PRESENTATION :**

Avec l'exploitation du programme nous avons obtenu les résultats suivant :

Expérience : Hauteurs : 0.5 cm / 1 cm / 1.5 cm / 2 cm / 2.5 cm / 3 cm / 3.5 cm / 4 cm / 4.5cm

<i>Hauteur de la flamme (en cm)</i>	<i>Intervalle de longueur d'onde utilisé (en μm)</i>	<i>Température (en K)</i>	<i>Facteur</i>
0.5	0.54-0.64	1856.1564	0.0182991
1	0.54-0.64	2033.6931	0.0210686
1.5	0.54-0.64	2088.6487	0.0332368
2	0.54-0.64	1932.0239	0.1592582
2.5	0.54-0.64	1902.5797	0.3180999
3	0.54-0.64	1883.1651	0.4381542
3.5	0.54-0.64	1858.053	0.6590015
4	0.54-0.64	1832.3855	0.7537693
4.5	0.54-0.64	1808.3226	0.9162045

TABLEAU 1: RECAPITULATIF DES RESULTATS



- **EXPLOITATION DES RESULTATS:**

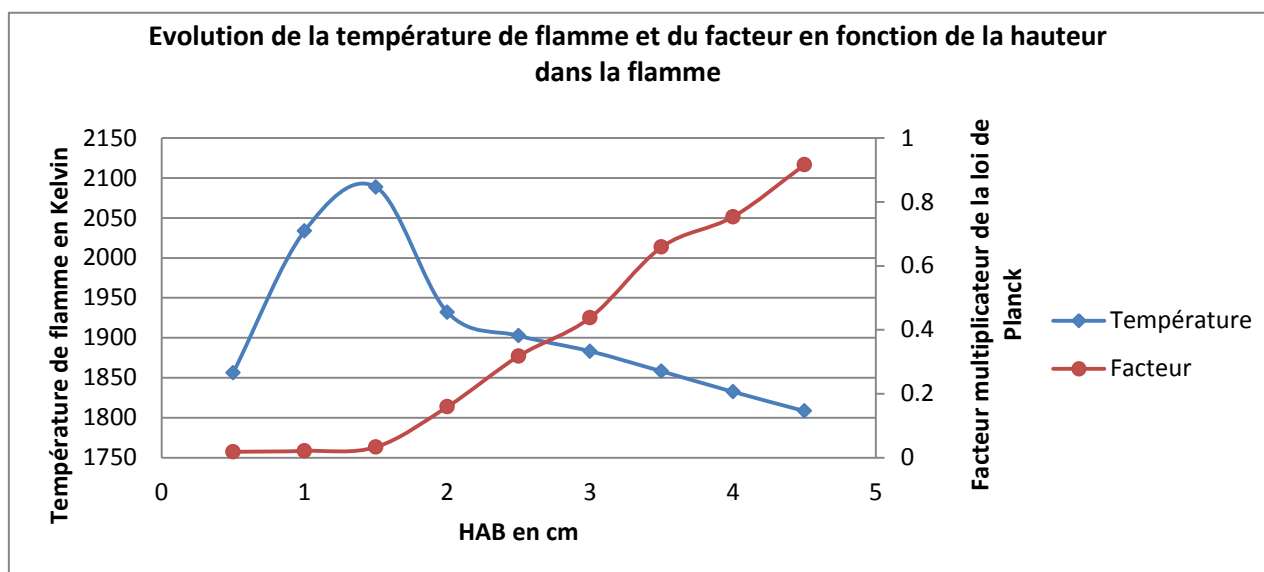


FIGURE 11: GRAPHIQUE DES RESULTATS OBTENUS

On observe une augmentation de la température sur les deux premiers cm de la flamme. Ce phénomène est dû à la présence des suies qui s'échauffent et prennent la température de la flamme. En effet, les suies présentes dans la flamme ne rayonnent pas de la même manière en fonction de la hauteur dans la flamme. Ceci est dû à l'évaporation de la couche organique (HAP) présente sur les suies. On constate ensuite une diminution de la température en montant le long de la flamme. Ceci s'explique par l'éloignement de la zone réactive en montant en dans la flamme.

Le coefficient multiplicateur de la loi de Planck croit en fonction de la hauteur de la flamme.

Pour bien valider le programme et les résultats obtenus, Yasmine et Louis ont modélisé avec SciLab une flamme homogène à une température connue (1800 K). Les résultats de la modélisation obtenus ont été analysés par le programme de détermination de température. La température évaluée pour cette flamme est 1800 K. Les résultats obtenus sur cette expérience sont donc validés.

4.2.5. INFLUENCE DE L'INHOMOGENEITE DE LA FLAMME SUR LES RESULTATS

On constate que la présence des suies dans la flamme peut engendrer des zones plus chaudes, c'est-à-dire un problème d'homogénéité.

Afin de tester la précision de nos mesures, nous avons voulu vérifier ce qui se passerait dans le cas d'une flamme non homogène. Bien que nous pensons que la non-homogénéité de notre flamme soit négligeable, nous devons en être certains.

Pour cela, nous avons créé un programme qui renvoie plusieurs informations sur une flamme « théoriquement » homogène et une flamme non-homogène qui suivrait une loi de



température Gaussienne. Le fonctionnement de ce programme est expliqué plus en détail dans les commentaires de son code.

Si la température dans la flamme suit une loi normale qui dépend du rayon de celle-ci, la température s'exprime avec la formule suivante :

$$\text{eq 7.} \quad T = T_{\min} + \Delta T e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{r}{\sigma}\right)^2}$$

La température sera maximale au centre de la flamme et diminuera sur les extrémités. En réalité, la flamme expérimentale ne suit pas forcément cette loi mais, le but est ici d'étudier les effets de l'inhomogénéité d'une flamme

La loi de Planck permet ensuite de déterminer la luminance émise par la flamme étudiée.

La deuxième partie notre programme affiche un profil linéique d'émission de la flamme à 400nm en fonction du rayon (*figure 13*).

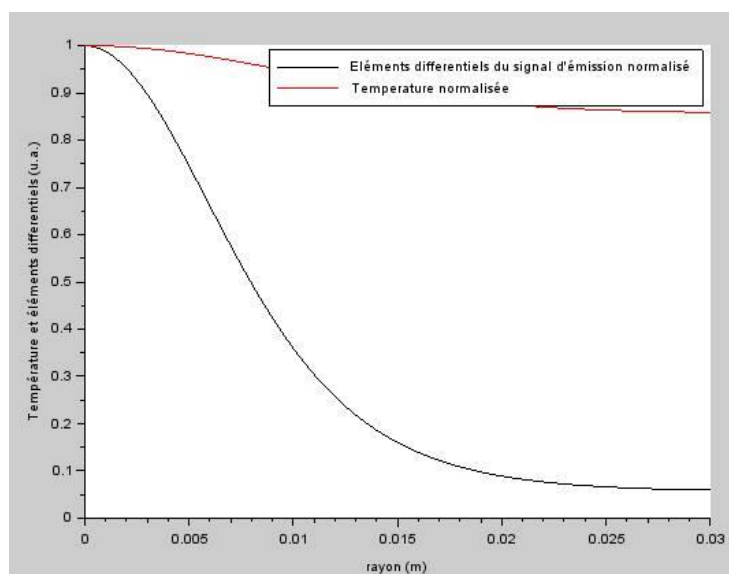


FIGURE 12: PROFIL LINEIQUE D'EMISSION DE LA FLAMME A 400NM EN FONCTION DU RAYON

La courbe rouge représente la température normalisée d'une flamme non-homogène suivant l'équation 7. La courbe noire représente les éléments différentiels du signal émis.

- **ANALYSE ET CONCLUSION :**

On constate que la température diminue de 15%, ce qui entraîne une variation de 94% des éléments différentiels du signal d'émission. Ceci s'explique par la loi de Planck qui donne plus de poids aux hautes températures.



Nous avons par la suite intégré (*cf annexe programme 2*) les éléments différentiels d'une flamme homogène à 1800K et la flamme étudiée précédemment, afin d'obtenir les spectres d'émission suivants :

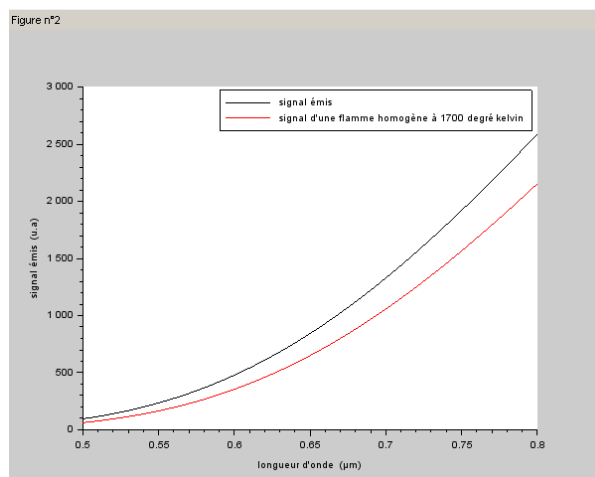


FIGURE 13: SPECTRES D'EMISSION DE LA FLAMME

- **ANALYSE ET CONCLUSION :**

Le signal émis s'intensifie lorsque la longueur d'onde augmente (*figure 14*). Nous remarquons que les deux courbes s'éloignent (écart de 18% à 800nm) en fonction de la longueur d'onde. Cela signifie que les imprécisions de mesure augmentent avec la longueur d'onde.

Pour affiner d'avantage nos résultats, nous sommes passés de la mesure de l'émission du signal dans un faisceau de la flamme à une hauteur précise, à toute la surface de la flamme à cette même hauteur.

Pour cela, nous avons utilisé les transformations d'Abel en intégrant le signal sur toute une surface circulaire (*les résultats sont stockés dans un fichier texte*).

Pour mieux se rendre compte, la première étape du programme consiste à analyser l'intersection du trait rouge et du plan vert (*voir figure 16*). Tandis que la deuxième consiste à analyser tout le plan à une hauteur donnée.



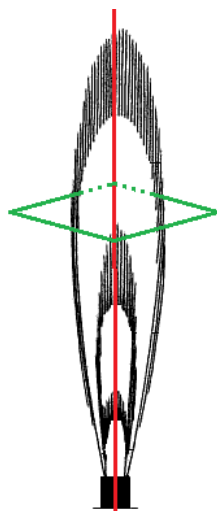


FIGURE 14: SCHEMA DES ZONES ANALYSEES

- **PRECISION DES RESULTATS**

A l'aide du programme précédent, nous avons modélisé une flamme avec pour températures extrêmes 1800 K (à l'extrémité) et 2100 K (au centre). Nous avons choisi un rayon pour la flamme de 0,2 cm (une valeur crédible) et avons fait varier σ (0,01 ; 0,02 ; 0,05) pour avoir un rapport entre ces deux valeurs de 20, 10 et 4, pour vérifier l'importance de ce rapport.

Les résultats obtenus par le programme précédent ont été analysés par le programme de détermination de température.

Les résultats obtenus sont les suivant :

Rapport r/σ	$r/\sigma = 4$	$r/\sigma = 10$	$r/\sigma = 20$
Température (en K) 1D	1965	1896	1857
Température (en K) 2D	2038	1969	1956

TABLEAU 2: TEMPERATURES OBTENUES AVEC LE PROGRAMME 1

Pour mieux visualiser les résultats, on affiche les profils de températures pour chaque rapport r/σ étudié afin de nous aider à choisir le rapport le plus probable.

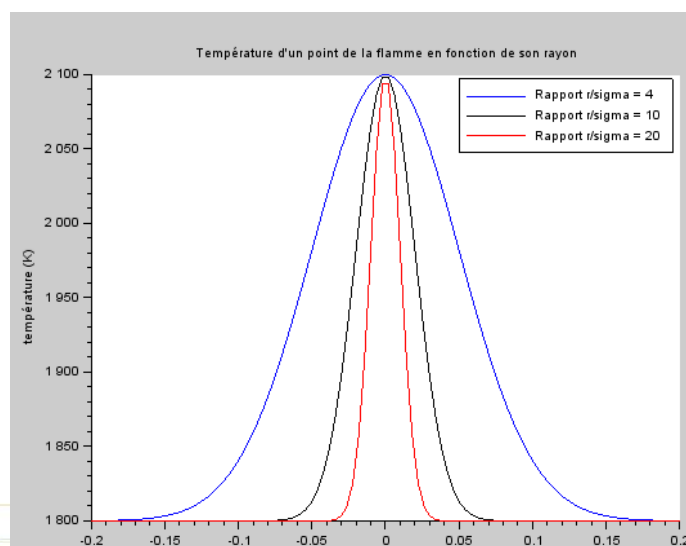


FIGURE 15: PROFIL DES TEMPERATURES

Pour comparer les résultats obtenus, on calcule la température théorique moyenne pour le cas 1D et 2D. Ces résultats correspondent aux températures moyennes de la flamme modélisée.

Calcul de la température théorique moyenne en 1D :

$$\text{eq 8.} \quad T_{\text{moy}} = \frac{1}{R} \int_0^R T(r) dr$$

Calcul de la température théorique moyenne en 2D :

$$\text{eq 9.} \quad T_{\text{moy}} = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^{2\pi} \int_0^R T(r) * r dr d\theta = \frac{2}{R^2} \int_0^R T(r) * r dr$$

Les températures moyennes obtenues sont les suivantes :

Rapport r/σ	$r/\sigma = 4$	$r/\sigma = 10$	$r/\sigma = 20$
Température moyenne (en K) 1D	1894	1838	1819
Température moyenne (en K) 2D	1837	1806	1802

TABLEAU 3: TEMPERATURES MOYENNES POUR LES DIFFERENTS RAPPORTS

- **INTERPRETATION**

On obtient ainsi le tableau des écarts relatifs :

Rapport r/σ	$r/\sigma = 4$	$r/\sigma = 10$	$r/\sigma = 20$
Ecart relatif (%) 1D	3,7	3,1	2,1
Ecart relatif (%) 2D	11,0	9,0	8,5

TABLEAU 4: ECARTS RELATIFS POUR LES RAPPORTS

Nous avons effectué les mesures pour trois rapports possibles mais nous considérerons que nos résultats sont ceux correspondant au rapport 4. En effet, en regardant les profils de températures pour chaque rapport, on se rend compte que les rapports 10 et 20 sont absurdes : ils impliqueraient une variation de température bien trop brutale au sein de la flamme. Le rapport 4 semble bien plus plausible (*voir figure 15*).

On remarque que l'écart relatif entre les températures moyennes et les températures rendues par le programme est bien plus faible si le spectrophotomètre mesure le signal sur un faisceau et non sur la flamme entière. En réalité, on ne sait pas vraiment quelle largeur le spectrophotomètre prend en compte et il faudrait faire des expériences poussées pour le découvrir.



5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

• CONCLUSIONS SUR LE TRAVAIL REALISE

Notre projet avait pour objectif principal la détermination de la température d'une flamme. Pour cela nous avons dans un premier temps effectué des recherches documentaires pour mieux comprendre notre sujet. Nous sommes ensuite passés à l'exploitation des résultats obtenus à l'aide de la spectrométrie. Pour cela nous avons créé un programme de fittage sur SciLab qui nous a permis d'avoir un premier aperçu des températures dans la flamme. Cependant, la non-homogénéité de la flamme nous a interpellés. Ainsi, nous avons estimé les effets de l'inhomogénéité de la flamme sur les résultats. On constate que l'effet de l'inhomogénéité est plutôt négligeable. En effet, l'écart relatif entre la température calculée et la température moyenne souhaité est relativement faible. Il semblerait donc que la zone où est effectuée la mesure, c'est-à-dire au centre de la flamme le long du faisceau formée par les suies, soit homogène. La température qu'on obtient est la température réelle avec un écart de 3 à 11 %. Par conséquent le tableau de température obtenu dans la partie analyse des résultats est validée.

Grâce à cette méthode de mesure, la spectrométrie, nous sommes parvenus à trouver une température qui correspond à celle de la flamme étudiée. Une bonne application des lois du rayonnement et de l'émissivité nous a permis alors d'obtenir des résultats assez précis.

Le travail a été réparti en deux parties distinctes : une étude documentaire et une étude expérimentale. Différentes méthodes de mesures et instruments ont été présentés dans ce rapport. De plus, nous avons appris à exploiter SciLab et créer deux programmes qui étudient la température de la flamme et son inhomogénéité. Ce projet nous a incités à pousser nos recherches. Ce fut intéressant d'appliquer des calculs complexes à un modèle de la vie réelle.

• CONCLUSIONS SUR L'APPORT PERSONNEL DE CET E.C. PROJET

Charlotte :

Ce projet m'a permis d'appliquer des notions parfois abstraites comme la spectrométrie, à un sujet concret. J'ai pu, grâce à ce projet mobilisé l'ensemble de mes connaissances sur le rayonnement et la spectrométrie. Il m'a également encouragé à effectuer des recherches supplémentaires pour approfondir mes connaissances. J'ai aussi pu découvrir un nouveau logiciel (SciLab) et son langage associé. Un tel projet m'a permis de développer ma capacité de réflexion et mon sens critique, notamment lors de l'écriture du programme. De plus, ce projet nous a appris à gérer le travail en équipe, en développant notre capacité à communiquer, à nous organiser et à planifier. Ainsi, avec le recul, nous pouvons dire que notre organisation était plutôt bonne, ce projet nous a permis de développer une bonne cohésion de groupe.



Louis B. :

En conclusion, j'ai personnellement trouvé ce projet particulièrement enrichissant car il m'a permis de travailler dans un groupe autour d'un thème appelant plusieurs domaines physiques et mathématiques, ainsi qu'à discuter et comparer l'efficacité des différentes méthodes envisageables avant de choisir la plus optimale. Je pense qu'il s'agit d'un projet bénéfique pour notre formation d'ingénieur, car elle fournit une approche plus poussée de ce à quoi nous sommes formés.

Je regrette personnellement que nous n'ayons pas eu l'occasion d'effectuer nous-même les mesures, contraintes de sécurité obligeant.

Louis :

Ce projet était pour moi la première fois en deux ans de STPI que j'utilisais tout ce que j'avais appris en physique dans un domaine « concret ». Bien entendu, nous avons aussi approfondi grandement nos connaissances ce qui m'a particulièrement plu. De plus, il m'a permis de travailler en groupe, notion très importante dans le monde du travail. Enfin, la partie programmation m'a beaucoup intéressé puisque je n'avais jamais utilisé Scilab et que je souhaite choisir Génie Mathématique comme département. Ainsi, je peux maintenant dire avec certitude que je souhaite continuer cette formation.

Valérian :

Ce projet m'a permis de travailler avec un groupe que je n'ai pas choisi mais qui m'a beaucoup plu et aidé à avancer. Les recherches documentaires que j'ai effectuées m'ont appris beaucoup de choses sur la physique de la spectrométrie et de la pyrométrie. M.YON nous a beaucoup aidés dans ce projet, et ça ne l'a rendu que plus intéressant. Le dispositif utilisé dans la salle de recherche a été captivant à étudier et le fait de l'avoir compris assez vite nous a donné plus de facilités dans la suite du projet et dans les objectifs à atteindre.

Yasmine :

Cet EC m'a fait découvrir une méthode de mesure de la température d'une flamme que je ne connaissais pas. Il m'a permis d'appliquer des formules mathématiques complexes à des mesures effectuées afin de les exploiter au plus juste. J'ai appris à utiliser SciLab. Ce projet m'a été attribué sans que je ne le choisisse. Cependant, mon groupe a été un moteur pour mon travail, ce qui a rendu le déroulement du projet agréable. J'ai aussi rencontré quelques difficultés au début dans la compréhension des notions. Grâce à M.YON et à mes camarades, j'ai réussi à surmonter ce problème.

- **PERSPECTIVES POUR LA POURSUITE DE CE PROJET**

Pendant le projet, nous avons brièvement parlé des suies. Pour approfondir le sujet, il faudrait les étudier plus particulièrement, par exemple, en analysant leur composition et propriétés. Il serait également intéressant d'analyser leur impact réel sur l'inhomogénéité de la flamme pour évaluer avec plus de précision l'incertitude des mesures effectuées.

De plus, si la méthode utilisée nous a permis d'obtenir des résultats cohérents avec la réalité, cette méthode de mesure s'avère pourtant pourvue d'incertitudes. Pour remédier à ce problème, il est envisageable de refaire des mesures à l'aide d'un appareil plus précis ou une méthode plus optimale.



6. BIBLIOGRAPHIE

- **Articles**

Méthode intrusives

Frédéric GRISCH, Pierre Gicquel, Philippe HERVE, « *Mesures de températures dans les gaz et les flammes - Mesures intrusives et mesures optiques intégrées* ». 10 septembre 2009. (Date de lecture : mars 2015)

Etude sur les pyromètres

Pierre FERDINAND, « Thermomètres à fibre optique sans contact : pyromètres – apports et limitations dus aux fibres optiques en pyrométrie ». 10 septembre 2003. (Date de lecture mai 2015)

- **Liens internet**

Loi de Planck et rayonnement (consultés en mai 2015)

- http://physicus.free.fr/premiere_S/pdf/CHAP-03-TP-05-loi-wien-black-body.pdf
- http://www.sft.asso.fr/Local/sft/dir/user-3775/documents/actes/journeessft/JSFT_27_28_1_2011/Boulet_P.pdf
- http://www.ixarm.com/xha_gemo_documents.php3?get_document=IMG/pdf/FEA-504-A-1.pdf
- <http://www.optris.fr/thermometres-infrarouges>
- <http://www.optris.fr/optris-ctlaser-f6>
- <http://oceanoptics.com/product-category/maya-series/>
- http://cermics.enpc.fr/scilab_new/site/Initiation/intro_scilab_2/intro_scilab_2.html#SECTION00040000000000000000

Notice d'utilisation (consulté en avril 2015)

Spectroscope Maya 2000 : <http://www.oceanoptics.com>



TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1: Organigramme des tâches et des étudiants concernés	2
Figure 2: Loi de Planck (courbes colorées) dérivant l'émission énergétique du corps noir à différentes températures	6
Figure 3: Principe de la spectrométrie photothermique impulsionnelle	8
Figure 4: Spectromètre MAYA au CORIA	9
Figure 5: Montage expérimental.....	9
Figure 6: Générateur de flamme.....	9
Figure 7: Intérieur du boîtier MAYA	10
Figure 8: Graphique de la somme des écarts en fonction de la longueur d'onde	12
Figure 9: Graphique de la somme des erreurs en fonction de la largeur de l'intervalle de longueurs d'onde	12
Figure 10: Fittage pour une hauteur dans la flamme à 4 cm	13
Figure 12: Graphique des résultats obtenus	14
Figure 13: Profil linéique d'émission de la flamme à 400nm en fonction du rayon	15
Figure 14: Spectres d'émission de la flamme.....	16
Figure 16: Schéma des zones analysées.....	17
Figure 15: Profil des températures	17

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1: Récapitulatif des résultats	13
Tableau 2: Températures obtenues avec le programme 1	17
Tableau 3: Températures moyennes pour les différents rapports	18
Tableau 4: Ecart relatifs pour les rapports	18



ANNEXES

6.1. LISTING DES PROGRAMMES REALISES

Voici les programmes commentés, réalisés lors du projet.

- **Programme de détermination de température :**

```
clear
lambdamin=0.54 // on sélectionne l'intervalle de longueurs d'onde étudié
lambdamax=0.64

B = fscanfMat('D:\INSA 2\S4\P6\Scilab\corrblanc2.txt') // chargement du fichier contenant les mesures
expérimentales
Select=(B(:,1)>lambdamin & B(:,1)<lambdamax)
xexp= B (Select,1) // axe des abscisses (lambda)
y1= B (Select,2) // chargement des valeurs expérimentales pour les différentes hauteurs dans la flamme (0.5 ;
1 ; 1.5 ; 2 ; 2.5 ; 3 ; 3.5 ; 4 ; 4.5 cm)
y2 = B (Select,3)
y3 = B(Select,4)
y4 = B (Select,5)
y5 = B (Select,6)
y6 = B (Select,7)
y7 = B (Select,8)
y8 = B (Select,9)
y9 = B (Select,10)
clf

for i=2:10 // trace les courbes expérimentales (en bleu)
    plot2d(xexp,B(Select,i),2)
end
xlabel("coor blanc en fonction de la longueur d onde", "longueur d onde (micro m)", "corr blanc") // on nomme les
axes sur graphique

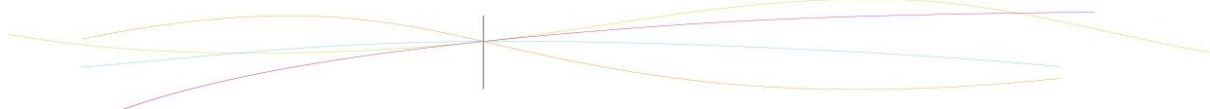
function [PI]=Planck(xexp, T) // loi de Planck : le modèle
    PI=(C1*ones(xexp)./xexp.^6)./(exp(C2*ones(xexp)./(xexp*T))-1)
endfunction

function [err]=Calculdiff(X, xexp, yexp) // calcul de l'erreur
    T=X(1)
    fact=X(2);
    [Model]=fact*Planck(xexp,T)
    err=(yexp-Model)
endfunction

// on pose les valeurs
C1 = 1.19*10^8 // les constantes
C2 = 14400

resultats =zeros (9,3) // on construit la matrice qui contiendra l'ensemble des résultats : température, facteur et
somme des valeurs absolues des différences entre le modèle et valeurs expérimentales

for i=2:10
    yexp = B(Select,i)
    X = [1800,0.8] // Hypothèses de température et du facteur
    [err,Xsol] = leastsq(list(Calculdiff,xexp,yexp),X) // estimation de la température et du facteur
```



```

plot2d(xexp, Xsol(2)*Planck(xexp,Xsol(1)),1) // courbe fit : courbe noire
différence=sum(abs(yexp-Xsol(2)*Planck(xexp,Xsol(1)))) // estimation de l'erreur
resultats (i-1,1)= Xsol(1) // remplissage de la matrice
resultats (i-1,2)= Xsol(2)
resultats (i-1,3)= différence
end
disp(resultats) // affichage de la matrice

```

- **Programme sur la non-homogénéité de la flamme :**

```

0001 clear //On nettoie toutes les données pour éviter les erreurs
0001 function [dSE, T]=CalculEmission(r) //Fonction qui prend en entrée une distance r et qui renvoie T sa température et
dSE la dérivé du signal que le spectro capte.
0002 T=Tmin + deltaT * exp(- (1/2) * (r/sigma).^2 );//On imagine une flamme dont la température suit une loi normale
0003 dSE=(C1/l1^6)*(exp(C2*ones(T)/(l1*T))-1).^(-1)//Eléments différentiels du signal reçus si le spectro reçoit une
bande de la flamme uniquement
0004 endfunction
0006 C1 = 1.119*10^8;//Deux constantes de la loi de Planck
0007 C2 = 14400;
0008 //On initialise toutes nos données.
0009 sigma=0.01//Pour la loi normale, on change cette valeur pour modifier le rapport R/sigma : 0,01 pour 20, 0,02 pour
10, 0,05 pour 4.
0010 lambdamin=0.4; //l'intervalle sur lequel on travaille
0011 lambdamax=0.8;
0012 l1=lambdamin;//On initialise l1 bien qu'il soit modifié avant d'être utile
0013 Nbp=100;//Le nombre de points souhaités
0014 Tmin=1800;//La température min de notre flamme
0015 deltaT=300;//La différence de température entre le centre et le tour de la flamme
0016 R=0.2;//Rayon de la flamme
0017
0018 rTab=linspace(0,3*sigma,100);//tableau des rayons de la flamme
0019 [ETab,TTab]=CalculEmission(rTab);//On calcul la température et les éléments différentiels en chaque point
0020
0021 f1=figure(1)
0022 clf
0023 plot2d(rTab,[ETab'/max(ETab),TTab'/max(TTab)], [1,5])//
0024 xtitle('r, rayon (m)', 'Température et éléments différentiels (u.a.)')
0025 legend('Éléments différentiels du signal d''émission normalisé', 'Temperature normalisée')
0026
0027 lambdaTab=linspace(lambdamin,lambdamax,Nbp);
0028 for i=1:Nbp
0029 l1=lambdaTab(i);
0030 deltaT=300;

```

On intègre les éléments différentiels du signal sur le rayon pour obtenir le signal :

$$SE = \int_0^R dSE(r) dr$$

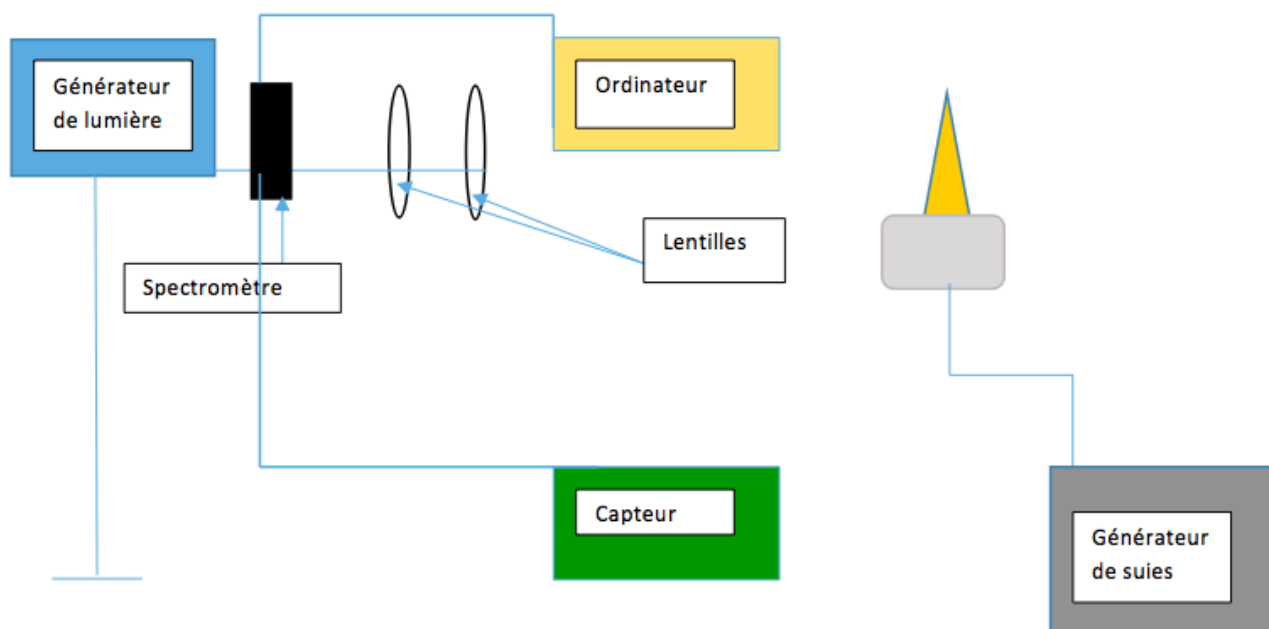
```

0031 SE(i)=intg(0,R,CalculEmission); //Signal dans la cas ou l'appareil ne capte qu'une bande sur la flamme avec
deltaT=300. On enregistre dans un tableau le signal pour chaque longueur d'onde étudié.
0032 deltaT=0;
0033 SETmin(i)=intg(0,R,CalculEmission); //Signal dans la cas ou l'appareil ne capte qu'une bande sur la flamme avec
deltaT=0 (homogène) pour vérifier le bon fonctionnement de l'autre programme
0034 end
0035
0036 function [dSE2, T2]=CalculEmission2(r)//Fonction qui prend en entrée une distance r et qui renvoie T sa température
et dSE les éléments différentiels du signal que le spectro capte.
0037 T2=Tmin + deltaT * exp(- (1/2) * (r/sigma).^2 );
0038 dSE2=r * ((C1/l1^6)*(exp(C2*ones(T2)/(l1*T2))-1).^(-1))//éléments différentiels du signal reçu si le spectro reçoit
la flamme dans son intégralité
0001 endfunction

```

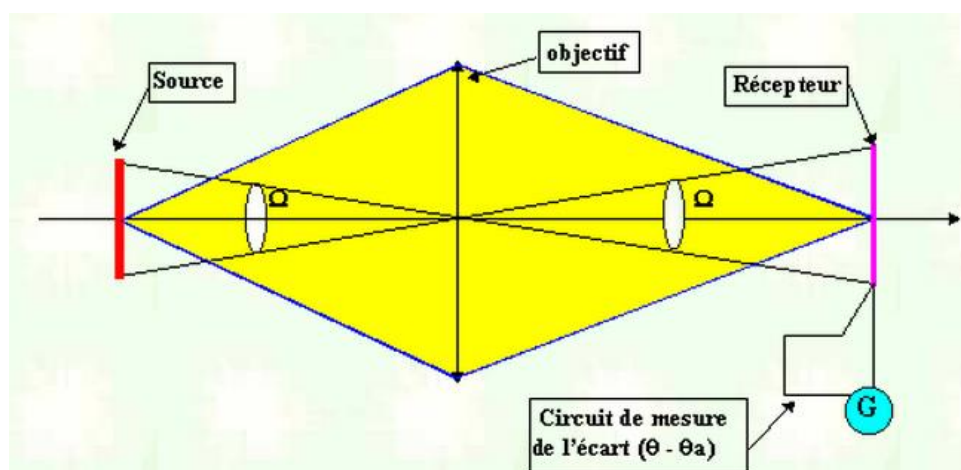


6.2. SCHEMA DU MONTAGE



6.3. EXPLICATIONS SUPPLEMENTAIRES SUR LES PYROMETRES

- **Pyromètre à radiation totale**



Le récepteur absorbe la puissance thermique incidente. La température du récepteur Θ s'élève par rapport à la température ambiante Θ_a . L'écart de température ($\Theta - \Theta_a$) induit une force électromagnétique thermoélectrique e . L'étalonnage de l'appareil donne une relation entre e et la température du corps noir à l'étalonnage.

- **Pyromètre monochromatique**

Le pyromètre monochromatique est le pyromètre le plus courant pour les mesures industrielles pour des mesures spécialisées.

L'appareil mesure, à l'aide d'un capteur photoélectrique, la température de luminance du corps dans des intervalles de longueurs d'onde très petits. L'écart entre la température de luminance T_λ et la température vraie T est ΔT :

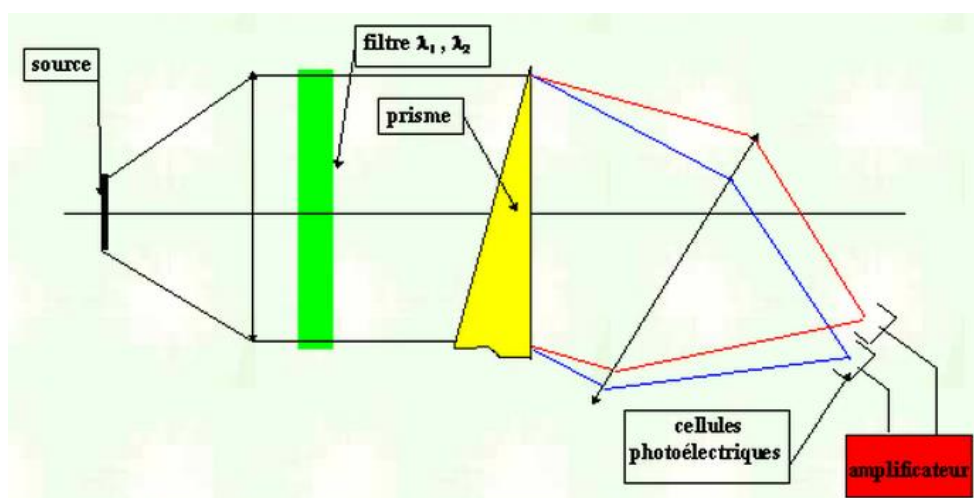
eq 10.
$$\Delta T \approx \left(T^2 \cdot \frac{\lambda}{C_2} \right) \cdot \ln(\varepsilon \cdot \tau)$$

τ la transmission de l'atmosphère à λ du pyromètre

$$C_2 = 1,44 \cdot 10^{-2} \text{ m.K.}$$

Un corps noir est utilisé lors de l'étalonnage. Il permet de faire correspondre la valeur du signal et la température.

- **Pyromètres bichromatique**



L'écart entre la température de couleur (mesurée) et la température vraie $\Delta T = T_c - T$ résulte de l'équation :

eq 11.
$$\Delta T \approx \frac{T^2}{C_2} \cdot \left(\frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \right) \cdot \ln \left[\frac{\varepsilon(\lambda_1) \cdot \tau(\lambda_1)}{\varepsilon(\lambda_2) \cdot \tau(\lambda_2)} \right]$$

$\tau(\lambda)$ le coefficient de transmission du milieu à la longueur d'onde λ
 ε l'émissivité de la cible à λ

Source schémas : <http://jflemen.iutlan.univ-rennes1.fr/CMMEST/mtherpyr.htm>

