

## PROJETS EXPÉRIMENTAUX DE PHYSIQUE STATISTIQUE

# Le Corps Noir



## I Description du projet

### Objectifs

Ce projet expérimental consiste en une étude des propriétés optiques du rayonnement d'un corps noir en fonction de sa température, propriétés caractérisées notamment par l'émittance énergétique totale  $E(T)$  ainsi que l'émittance spectrale  $e(\lambda, T)$ . Un corps noir est un corps idéal qui absorbe parfaitement toutes les radiations quelle que soit leur longueur d'onde. Les caractéristiques du rayonnement émis par un tel corps ne dépendent que de sa température.

L'émittance énergétique totale  $E(T)$  de ce corps noir à la température  $T$  représente la puissance totale émise par unité de surface de celui-ci. Afin d'obtenir expérimentalement la loi de variation de l'émittance totale  $E(T)$  avec la température (loi de STEFAN-BOLTZMANN), on étudiera la variation de la puissance émise par le corps noir pour différentes températures.

L'émittance spectrale  $e(\lambda, T)$ , quant à elle, représente la puissance émise par unité de surface du corps noir à la température  $T$  et par unité de longueur d'onde. Afin d'obtenir expérimentalement la loi de variation de l'émittance spectrale avec la longueur d'onde (loi de PLANCK), on mesurera la puissance émise à différentes longueurs d'onde en dispersant le rayonnement émis par le corps noir à l'aide d'un monochromateur à réseau, et ce pour différentes températures. À la lumière des différentes courbes obtenues, on essaiera d'établir la loi donnant la variation du maximum de ces courbes avec la température (loi du maximum de WIEN).

### Mode de travail

Au cours des journées préparatoires réparties sur le premier semestre, un cahier de TP permet à chaque binôme de retracer la mise au point de l'expérience, y compris la recherche bibliographique sur le sujet. Le cahier doit refléter la progression du travail du binôme. C'est un outil de travail, et en aucune façon il ne doit être considéré comme une œuvre d'art!

Les mesures proprement dites sont également consignées dans le cahier de TP au fur et à mesure de leur déroulement, ainsi que les algorithmes de traitement employés et les

résultats obtenus. Le but de ce cahier est de vous permettre de vous retrouver dans vos différentes mesures : dans quelles conditions les mesures ont-elles été faites, avec quelle méthode, etc... À la fin du dernier jour de cette période groupée, chaque binôme rédige un compte-rendu écrit du TP (trois copies doubles maximum, figures non comprises), dans lequel il présente l'expérience, décrit le montage et les algorithmes de prise de données et de traitement, puis fournit les grandeurs caractéristiques extraites des données expérimentales. Une journée supplémentaire est ensuite consacrée aux présentations orales des projets de chaque groupe. L'exposé d'un binôme ne doit pas dépasser 20 minutes, suivies d'une discussion d'une dizaine de minutes portant sur les divers aspects du projet (bibliographie, montage, analyse, etc...).

Le compte-rendu et le cahier seront remis aux enseignants le jour de l'exposé oral.

Remarques :

- Il est vivement conseillé de garder trace du numéro de PC sur lequel vous travaillez. Cela peut permettre de récupérer vos fichiers en cas d'erreur du système de sauvegarde. De plus, effectuez régulièrement des sauvegardes sur l'ordinateur PC30 (via le réseau).
- Il est formellement interdit de copier les programmes sur disquette.
- La communication entre binômes est encouragée, mais ne doit pas aller jusqu'au pompage optique...

## II Le rayonnement du corps noir : éléments théoriques

### Loi de PLANCK

La loi donnant la densité spectrale d'énergie  $u_\nu(\nu, T)$  représentant l'énergie par unité de volume et par unité de fréquence ( $\text{J m}^{-3} \text{Hz}^{-1}$ ) contenue dans une enceinte fermée maintenue à température constante  $T$  et connue sous le nom de loi de PLANCK est :

$$u_\nu(\nu, T) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \left( \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1} \right).$$

La densité spectrale d'énergie par unité de longueur d'onde  $u_\lambda(\lambda, T)$  est, compte tenu du fait que :  $\nu = c/\lambda$  et  $d\nu = c/\lambda^2 d\lambda$  :

$$u_\lambda(\lambda, T) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \left( \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1} \right) = \frac{C_1}{\lambda^5} \left( \frac{1}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1} \right).$$

Si on veut connaître la forme de la densité totale d'énergie  $u$  contenue dans l'enceinte ( $\text{J m}^{-3}$ ), il faut donc intégrer sur toutes les fréquences et on obtient :

$$u = \frac{8\pi h}{c^3} \int_0^\infty \frac{\nu^3}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1} d\nu = \frac{8}{15} \frac{k^4 \pi^5}{h^3 c^3} T^4 = \sigma' T^4.$$

### Émittance énergétique totale du corps noir $E(T)$

Soit une enceinte à une température constante  $T$ , simulant un corps noir, dans laquelle règne dans toutes les directions de l'espace et en tout point, une densité totale d'énergie  $u$ .

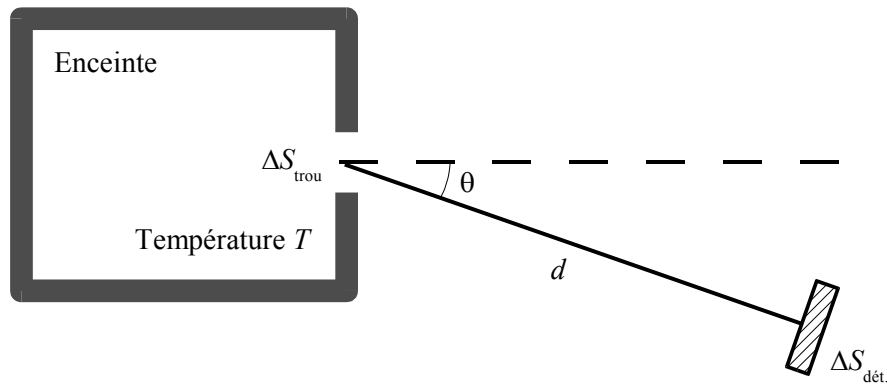


FIGURE 1 : Modélisation d'un corps noir par une cavité isotherme.

Perçons cette enceinte d'un petit trou de surface  $\Delta S_{\text{trou}}$  et calculons l'énergie  $\Delta e$  que reçoit pendant un temps  $\Delta t$  un détecteur de surface  $\Delta S_{\text{dét.}}$  situé à une distance  $d$  du trou et dans une direction faisant un angle  $\theta$  par rapport à la normale de la surface du trou, comme le montre la figure 1.

L'énergie rayonnée est donnée par la formule suivante :

$$\Delta e = \frac{u}{4\pi} c \Delta t \Delta S_{\text{trou}} \cos \theta \Delta \Omega_{\text{dét.}},$$

où  $\Delta \Omega_{\text{dét.}}$  représente l'angle solide, vu par le trou, du détecteur (supposé perpendiculaire à la direction du trou) ;  $\Delta \Omega_{\text{dét.}} = \Delta S_{\text{dét.}} / d^2$ .

L'émittance énergétique  $E(T)$  est donc définie comme la puissance totale rayonnée dans tout le demi-espace par unité de surface du trou ( $\text{W.m}^{-2}$ ) :

$$E(T) = \frac{1}{\Delta S_{\text{trou}}} \iint \frac{\Delta e}{\Delta t} = \frac{u}{4\pi} c \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi/2} \cos \theta \sin \theta d\theta = u \frac{c}{4}.$$

On obtient donc finalement la loi de STEFAN-BOLTZMANN :

$$E(T) = \sigma' T^4 \frac{c}{4} = \frac{2}{15} \frac{k^4 \pi^5}{h^3 c^3} T^4 = \sigma T^4.$$

$\sigma$ , la constante de Stefan, vaut  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ .

La puissance reçue par un détecteur de surface  $\Delta S_{\text{dét.}}$  situé dans la direction perpendiculaire à la surface du trou est donc :

$$P = \frac{\sigma'}{4\pi} T^4 c \Delta S_{\text{trou}} \frac{\Delta S_{\text{dét.}}}{d^2} = \frac{\sigma}{\pi} \Delta S_{\text{trou}} \frac{\Delta S_{\text{dét.}}}{d^2} T^4.$$

### III Montages expérimentaux

#### Étude de l'émittance énergétique totale $E(T)$

Le montage expérimental permettant d'étudier l'émittance énergétique totale  $E(T)$  est représenté sur la figure 2.

Un creuset cylindrique à base de graphite de diamètre  $\phi \sim 20 \text{ mm}$  joue ici le rôle de corps noir. Celui-ci est en effet situé à l'intérieur d'un four, dans un orifice percé à l'intérieur du

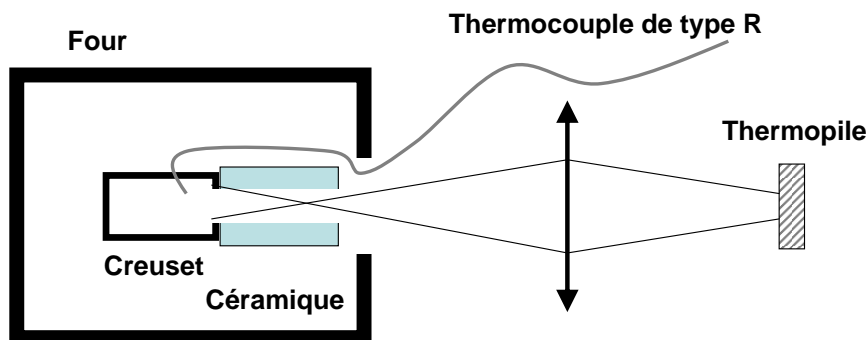


FIGURE 2 : Schéma du montage permettant d'étudier l'émittance totale  $E(T)$ .

matériau réfractaire isolant thermiquement le four de l'extérieur. Il est par ailleurs isolé par un cylindre en céramique agrégée qui joue le rôle de diaphragme. Celui-ci a pour but de limiter les pertes par rayonnement et de faire en sorte que la température à l'intérieur du four soit la plus uniforme possible.

Le rayonnement lumineux provenant de la surface du corps noir est alors concentré grâce à une lentille convergente en fluorine (Fluorure de calcium :  $\text{CaF}_2$ ) de distance focale  $f$  et de diamètre  $\phi = 28 \text{ mm}$ , sur un mesureur de puissance de type thermopile. La surface sensible de ce détecteur est donnée dans sa documentation. Une thermopile est un détecteur constitué d'un ensemble de petits thermocouples (voir TP sur l'effet SEEBECK) disposés en série. Toutes les jonctions de type « soudures froides » de ces thermocouples montés en série sont reliées à un élément de grande inertie thermique dont la température est proche de la température ambiante  $T_0$ , tandis que les jonctions de type « soudures chaudes » sont elles, soudées sur le petit élément noir absorbant de  $2 * 2 \text{ mm}^2$  de surface ayant une faible inertie thermique. Une différence de potentiel induite par une différence de température entre l'élément absorbant et la partie à température ambiante, apparaît donc entre les différentes extrémités de chaque thermocouple. Le fait que les différents thermocouples soient placés en série implique que la différence de potentiel totale apparaissant entre la jonction « soudure froide » du premier thermocouple et la jonction « soudure chaude » du dernier thermocouple correspond donc à la somme des tensions apparaissant aux extrémités des différents thermocouples. Cette astuce permet en fait d'augmenter la sensibilité du détecteur et d'obtenir une tension de l'ordre de quelques millivolts, facilement mesurable. Cette tension est au final proportionnelle à la puissance lumineuse reçue par l'élément absorbant (voir documentation pour la conversion). Celle-ci est envoyée au PC qui la digitalise par l'intermédiaire de la carte Convertisseur Analogique Digitale National Instruments de type PCI 6024 E.

La température au centre du four est mesurée par l'intermédiaire d'un thermocouple de type R fait d'un fil conducteur en Rhodium pur soudé à un autre constitué d'un mélange de 13 % de Platine et 87 % de Rhodium. Celui-ci fonctionne dans la gamme de température allant de  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$  à  $1750 \text{ }^\circ\text{C}$ . La tension aux bornes du thermocouple est mesurée par la carte PCI. LabView comporte un VI qui peut convertir la tension du thermocouple de type R en température.

**!! ATTENTION !!**

- Ne pas dépasser une température de 1200 °C au sein du creuset. On fera notamment attention à l'inertie du système four + creuset.
- Le thermocouple sortant du creuset est extrêmement fragile. Faire attention en le manipulant.
- La céramique et le creuset sont ... chauds. Ne pas les sortir de façon irréfléchie.

**Étude de l'émittance énergétique spectrale  $e(\lambda, T)$** 

Le montage expérimental permettant d'étudier l'émittance énergétique spectrale est représenté sur la figure 3.

Ce montage ressemble beaucoup au montage précédent. Les quelques différences qui apparaissent résident dans le fait que le rayonnement provenant du four est, cette fois-ci, non plus focalisé directement sur la photopile, mais sur la fente d'entrée d'un monochromateur à réseau de type 77300 1/8 m de la société ORIEL.

Le monochromateur utilisé, monté sur le principe dit de « Ebert-Fastie », est constitué de deux miroirs plan, d'un miroir sphérique et d'un réseau hors-plan, comme le montre la figure 4.

Un rayonnement polychromatique focalisé sur la fente d'entrée rectangulaire de largeur 1.56 mm est envoyé, par réflexions successives sur un miroir plan et un miroir sphérique, sur un réseau dit « blazé » dont la surface striée par des traits en « marche d'escalier » est représentée sur la figure 5.

Le rayonnement polychromatique arrivant sur le réseau est dispersé de telle sorte qu'à une direction de dispersion correspond une longueur d'onde suivant la loi de dispersion du réseau blazé donnée par :

$$a(\sin D + \sin I) = m\lambda ,$$

où  $m$  est l'ordre de diffraction,  $a$  est le pas du réseau (distance entre 2 stries du réseau – sachant que l'on caractérise toujours un réseau par l'inverse de  $a$  qui représente donc le nombre de traits par mm),  $D$  est l'angle de déviation par rapport à la normale au réseau et  $I$  l'angle d'incidence comme l'indique la figure 5. En changeant l'orientation du réseau monté sur une platine tournante, il est alors possible de faire passer devant la fente de sortie rectangulaire du monochromateur, les différentes composantes en longueur d'onde

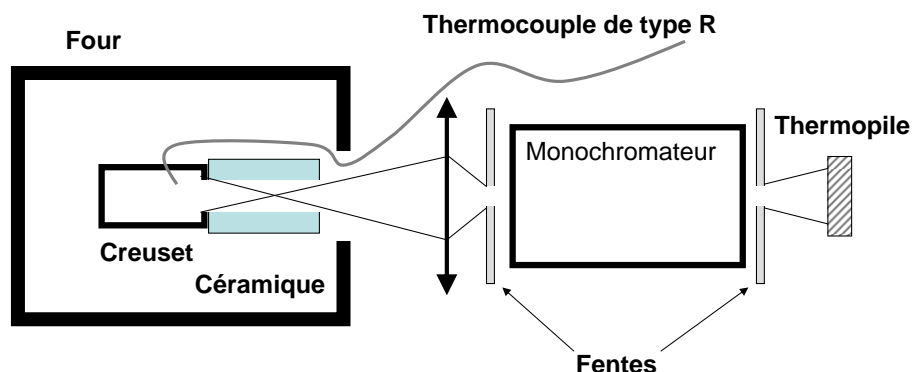


FIGURE 3 : Schéma du montage expérimental permettant d'étudier l'émittance spectrale.

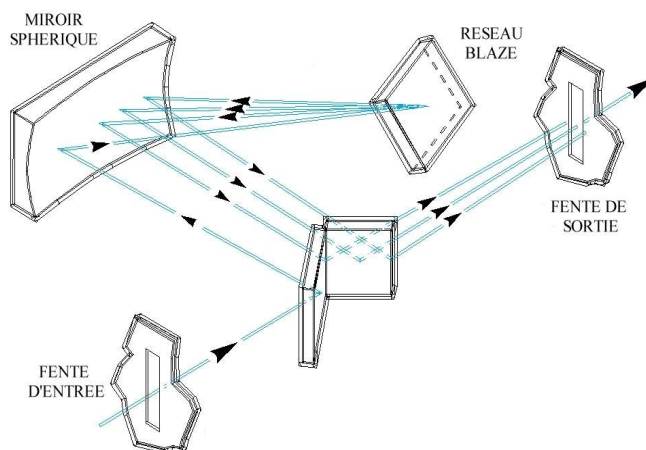


FIGURE 4 : Schéma du monochromateur (principe Ebert-Fastie).

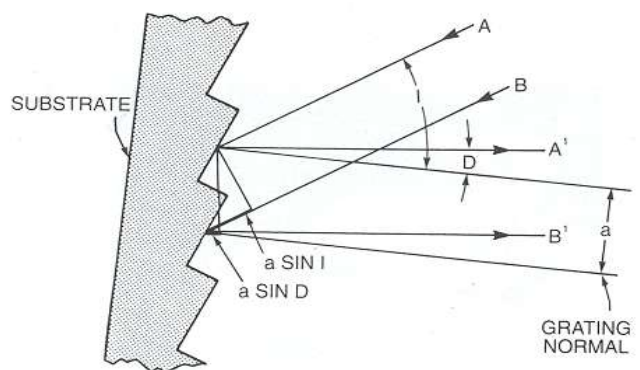
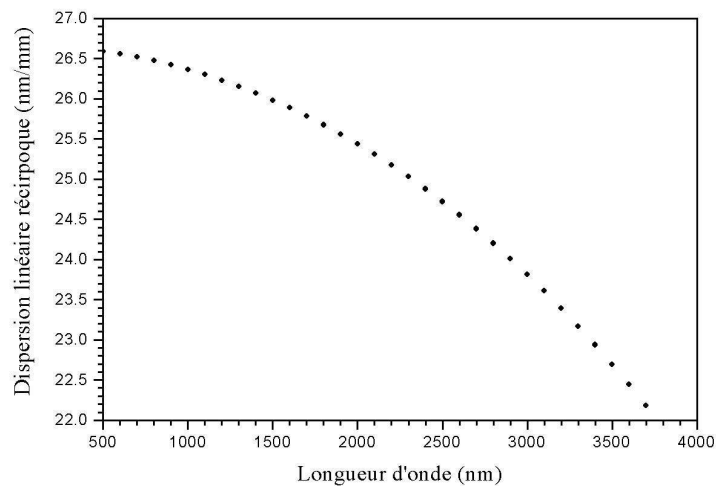


FIGURE 5 : Schéma de la surface d'un réseau blazé.

du rayonnement. Une calibration de l'orientation du réseau pour une longueur d'onde donnée a été réalisée, ce qui permet d'avoir directement, sur un vernier, la valeur de la longueur d'onde du rayonnement sortant du monochromateur. Il est cependant à noter que, originellement, l'échelle en longueur d'onde du vernier était adaptée à un réseau ayant 1200 traits par mm. Celui-ci a été remplacé, pour l'expérience qui nous intéresse, par un réseau moins dispersif possédant seulement 300 traits par mm. Il faut donc répercuter ce changement de réseau sur l'échelle des longueurs d'onde dont la valeur lue doit donc être multipliée par 4 pour être correcte. La largeur des fentes dans ce type de monochromateur influe sur la largeur spectrale  $\Delta\lambda$  du rayonnement sortant de celui-ci. Cette largeur spectrale qui dépend de la longueur d'onde correspond au produit de la largeur de la fente par la dispersion linéaire réciproque qui s'obtient en différenciant la loi des réseaux précédente et en tenant compte des caractéristiques notamment d'angle d'ouverture du monochromateur. La figure 6 représente d'ailleurs la variation de la dispersion linéaire réciproque en fonction de la longueur d'onde (disponible sous forme de fichier ASCII). Elle est typiquement de 25.6 nm/mm à  $\lambda = 2 \mu\text{m}$ . Pour une largeur de fente de 1.56 mm, qui correspond à la plus grande largeur pour les fentes à votre disposition, la largeur spectrale du rayonnement sortant est  $\Delta\lambda = 37.4 \text{ nm}$  à  $2 \mu\text{m}$ . Cette largeur est à prendre en compte lors du traitement des données car la puissance mesurée par la photopile placée après le monochromateur est directement proportionnelle au produit  $e(\lambda, T) * \Delta\lambda$ , produit qui est d'autant plus grand

FIGURE 6 : *Dispersion linéaire réciproque du monochromateur.*

que  $\Delta\lambda$  est grand.

Le réseau, ainsi que les miroirs, n'ont pas une efficacité de réflexion identique pour toutes les longueurs d'onde. Cette efficacité relative est caractérisée par une courbe d'efficacité dite « fonction d'appareil » qui est inconnue. On pourra s'interroger sur son influence.

Un potentiomètre est relié au monochromateur ; il varie continûment avec le réseau. La mesure de la résistance de ce potentiomètre permet donc de connaître la longueur d'onde du rayonnement sortant du monochromateur.

## IV Travail expérimental à effectuer

Le travail à effectuer consiste tout d'abord, à obtenir la loi de variation de l'émittance énergétique totale  $E(T)$  en fonction de la température  $T$  du corps noir. Dans un deuxième temps, vous étudierez la dépendance spectrale de cette émission. Les mesures ne sont pas difficiles en elles-mêmes, mais demandent du soin et de la patience.

### Étude expérimentale de $E(T)$

Le but de cette étude est de déterminer expérimentalement la loi qui relie  $P$  à  $T$ .

#### Précautions préalables

- Déterminez la puissance maximale pouvant être reçue par la thermopile. En effet, les soudures liant les différents thermocouples entre eux peuvent être endommagées au-delà d'une certaine température de l'élément absorbant. Vous trouverez dans la documentation de la thermopile la valeur limite de puissance à ne pas dépasser et que vous inclurez dans votre programme.
- On vérifiera également dans les documentations que la réponse du montage est uniforme dans la gamme des longueurs d'onde considérées ici.
- Vous avez à votre disposition plusieurs lentilles convergentes en fluorine. Vous choisirez la (les) plus adaptée(s) à vos besoins.

**Écrivez un programme** pour mesurer et enregistrer  $P$ , la puissance reçue par la thermopile et  $T$ , la température du four. Vous pourrez notamment utiliser le VI Convert Thermocouple Reading (Functions » Data Acquisition » Signal Conditioning). Ce VI utilise une compensation de la jonction froide pour tenir compte de la température de la pièce (un thermocouple mesure une différence de température, pas une température absolue). Cette tension est normalement mesurée; ce n'est pas le cas dans ce montage. Déterminez la tension correspondant à peu près à la température de la pièce, que l'on supposera constante.

Prévoyez également dans le programme un enregistrement des données à chaque tour de boucle, permettant ainsi d'éviter les mauvaises surprises de type blocage du programme (ou autres) juste avant l'enregistrement dans le cas d'un enregistrement global à la fin de l'expérience.

**Vérifiez** la dépendance thermique de la puissance reçue par la thermopile et évaluez la constante de STEFAN  $\sigma$ . Vous veillerez notamment à discuter les artefacts expérimentaux possibles.

### Étude expérimentale de l'émittance spectrale

Le travail à effectuer consiste, à obtenir les lois de variation de l'émittance énergétique spectrale  $e(\lambda, T)$  en fonction de la longueur d'onde du rayonnement pour le corps noir (loi de PLANCK), et ce pour différentes températures. À la lumière des différentes courbes obtenues, vous essaieriez d'établir la loi donnant la variation du maximum de ces courbes avec la température (loi du maximum de WIEN).

**Avant de réaliser le montage expérimental**, calibrez la longueur d'onde apparaissant sur le vernier du monochromateur avec la résistance  $R$  du potentiomètre. N'oubliez pas de prendre en compte pour la longueur d'onde, le facteur multiplicatif 4, dû au changement de réseau.

**Adaptez votre programme LabView** afin de mesurer à la fois la longueur d'onde  $\lambda$  du rayonnement donnée par le vernier du monochromateur, la température  $T$  donnée par le thermocouple de type R, et la puissance lumineuse  $P$  reçue par la thermopile. Ce programme vous permet d'enregistrer des courbes  $e(\lambda, T)$  pour différentes températures.

Avant de procéder aux mesures, vous pourrez vous placer à une longueur d'onde voisine de  $2 \mu\text{m}$  et optimiser le signal reçu par la photopile en ajustant les positions des différents éléments du montage.

Tracez ces courbes. Discutez de leur allure générale. Si vous avez le temps, vous pourrez discuter l'influence de la largeur des fentes d'entrée du monochromateur.

**Les courbes** que vous obtenez expérimentalement ne représentent pas directement l'émittance spectrale. En effet, il faut tenir compte de la dispersion réciproque du réseau, et de la fonction de l'appareil pour extraire le bon résultat. Essayez de corriger ces effets, en discutant les méthodes que vous utilisez.

Comparez ensuite vos résultats expérimentaux traités et les résultats théoriques. L'accord est-il satisfaisant? Commentez. Donnez votre sentiment en ce qui concerne une éventuelle amélioration de cette expérience.



## V Bibliographie

- Cours de thermodynamique statistique, Magistère et maîtrise de physique fondamentale, Paris XI.
- G. Bruhat, A. Kastler, et R. Vichniewsky : *Cours de physique générale : Thermodynamique*.