

TP de Photométrie – Sphère intégrante

A préparer avant la séance. Durée 4h. Compte rendu à rendre à J+7.

1. Introduction

La sphère intégrante est un outil indispensable pour de nombreuses mesures photométriques, notamment les mesures de flux émis par une source lumineuse, ou les facteurs de réflexion de surfaces. Le but de ce TP est de s'exercer à la métrologie photométrique et d'illustrer plusieurs utilisations de la sphère intégrante pour caractériser sources et surfaces. Un des points importants de ce TP est d'identifier toutes les incertitudes sur les grandeurs calculées et/ou mesurées et de bien les estimer. *Tous les calculs devront donc être accompagnés de calcul d'incertitudes.*

2. Rappels de radiométrie

Voici quelques rappels de notions radiométriques utiles dans ce TP.

- **Flux spectrique $F_e(\lambda)$, flux énergétique F_e** - Un signal lumineux est caractérisé par son flux spectrique en W/nm. Le flux énergétique total, en W, est défini par :

$$F_e = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} F_e(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

- **Flux visuel F_v** - La réponse de l'œil humain standard à ce signal, appelé flux visuel est donné par la somme du flux spectrique multiplié par la fonction de sensibilité de l'œil, $V(\lambda)$, tracée dans la figure 1 et donnée dans le fichier **Spectra.xls** :

$$F_v = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} F_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

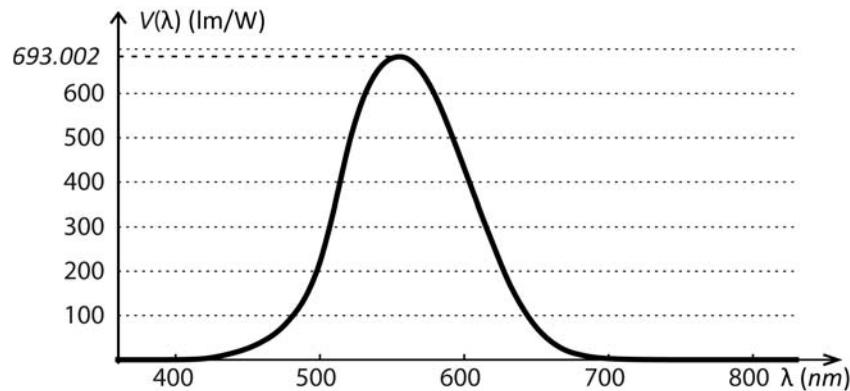


Figure 1 – Sensibilité spectrale de l'œil standard.

- **Efficacité lumineuse K** - Rapport entre le flux visuel et le flux énergétique total :

$$K = \frac{F_v}{F_e} = \frac{\left(\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} F_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda \right)}{\left(\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} F_e(\lambda) d\lambda \right)} \quad (3)$$

- **Réponse d'un détecteur** - Lorsqu'un détecteur reçoit ce signal, il le convertit en courant électrique i qui dépend de sa réponse spectrale $R(\lambda)$ en $A.W^{-1}.nm^{-1}$

$$i = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} F_e(\lambda) R(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

Pour que le détecteur puisse mesurer directement un flux visuel, il faut que sa réponse spectrale soit proportionnelle à celle de l'œil standard. Dans ce cas, on a

$$i = \sigma \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} F_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda = \sigma F_v \quad (5)$$

où F_e désigne bien entendu le flux reçu par la photodiode. On peut donc déterminer σ à partir d'un signal lumineux dont le flux spectrique est connu. On prend en général une lampe étalon dont le flux spectrique a été mesuré avec précision pour une valeur nominale d'alimentation électrique spécifiée.

• **Couleur** – La couleur du signal lumineux est définie par ses valeurs tristimulus (X, Y, Z), sommes du flux spectrique multiplié par les fonctions d'égalisation $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$:

$$\begin{aligned} X &= \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} F_e(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y &= \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} F_e(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z &= \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} F_e(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (6)$$

On en déduit les valeurs chromatiques (x, y) du signal par les équations :

$$\begin{aligned} x &= X / (X + Y + Z) \\ y &= Y / (X + Y + Z) \end{aligned} \quad (7)$$

• **Facteur de réflexion hémisphérique, ou albedo** – L'albedo d'une surface est le rapport entre le flux énergétique total F_r réfléchi par la surface et le flux énergétique total F_e incident, sur une plage de longueur d'onde donnée :

$$\rho = \frac{F_r}{F_e} = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \rho(\lambda) F_e(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} F_e(\lambda) d\lambda} \quad (8)$$

où $\rho(\lambda)$ est le facteur spectral de réflexion (ou albedo spectrale).

• **Light Reflectance Value (LRV)** d'une surface est une grandeur indiquant la capacité de la surface à réfléchir la lumière. Elle est très utilisée en architecture d'intérieur notamment pour la conception d'éclairage et les calculs de luminosité ambiante. Elle vaut 1 quand la surface réfléchit toute la lumière incidente et 0 quand elle ne la réfléchit pas du tout. Elle est définie à partir de l'albedo spectrale $\rho(\lambda)$ de la surface et de la courbe de sensibilité de l'œil $V(\lambda)$:

$$LRV = \frac{\int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} \rho(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} V(\lambda) d\lambda} \quad (9)$$

3. Matériel à disposition

Le matériel à disposition pour ce TP comprend :

- sphère intégrante RT-060-SF de Labsphere (diamètre 6 inches),
- lampe étalon IHLS-100-SCL-600 de Labsphere,
- alimentation stabilisée Elc pour alimenter les sources,
- multimètre Chauvin Arnoux CA-5273 (mesure du courant alimentant la lampe étalon),
- photodiode silicium Thorlabs DET10,
- pico-ampèremètre Keithley 485 (mesurer du courant issu de la photodiode)
- spectrophotomètre USB-650 d'Ocean Optics + logiciel SpectraSuite
- luminancemètre Konica Minolta LS-100

La documentation des instruments de mesure est mise à disposition pour le calcul des incertitudes.

Sphère intégrante

La sphère est un modèle RT-060-SF de LabSphere de diamètre de 6 inches (soit 76 ± 1 mm). Elle possède sur son équateur 3 ports de 1 inch de diamètre ($31,8 \pm 0,2$ mm) et 2 ports de 1.25 inch de diamètre ($12,7 \pm 0,2$ mm), ainsi qu'un port au pôle sud de 0.5 inch de diamètre ($12,7 \pm 0,2$ mm) dédié à la photodiode (figure 2).

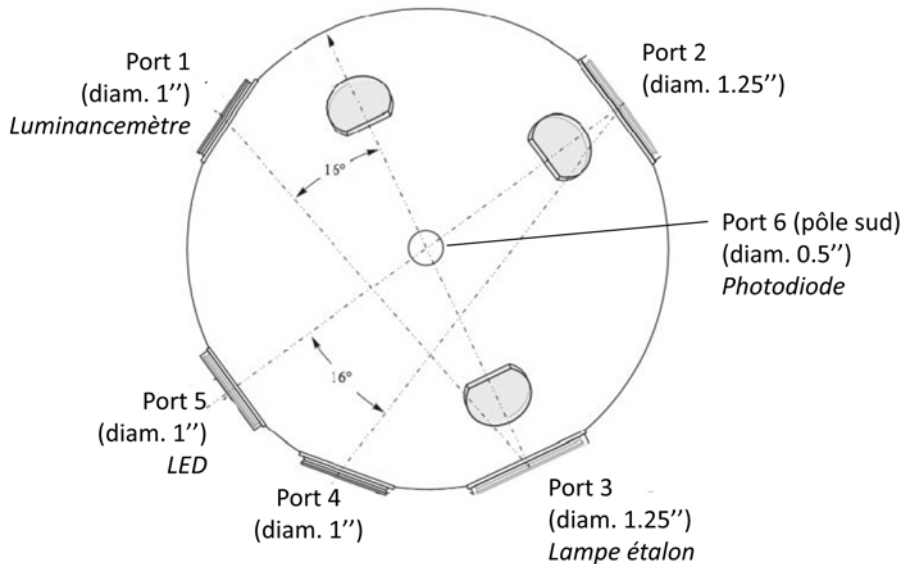


Figure 2 – Représentation schématique de l'intérieur de la sphère intégrante (vu de dessus).

Le facteur spectral de réflexion, ou albedo spectrale $\rho(\lambda)$, de son revêtement interne a été mesuré avec précision par le constructeur dans une pièce de $23 \pm 3^\circ\text{C}$. Il est proche de 0.99 dans le visible grâce à un matériau très peu absorbant, ce qui en fait une sphère de très bonne qualité (voir la courbe figure 3 et les valeurs constructeur dans le fichier **Spectra.xls** mesurées avec une incertitude inférieure à 0.020 dans les plages spectrales 250-299 nm et 2201-2500, et inférieure à 0.005 dans la plage spectrale 300-2200 nm).

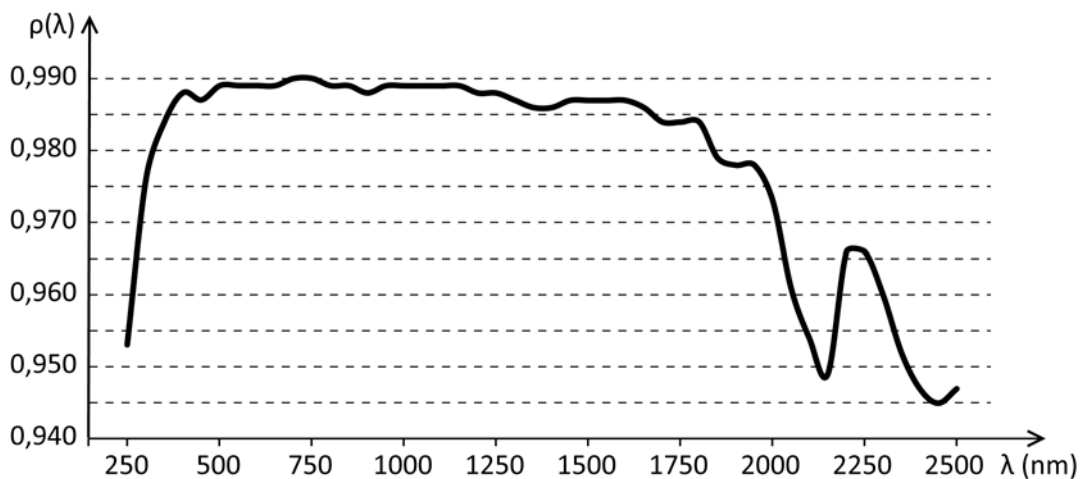


Figure 3 – Albedo spectrale du revêtement de la sphère intégrante.

Question 1 : Calculer la Light Reflectance Value (LRV) du revêtement de la sphère.

Éclairement en tout point de la sphère – La sphère produit un éclairage uniforme sur toute sa surface interne. Par ailleurs, si on prend deux éléments d'aire ds_1 et ds_2 sur cette surface, l'étendue géométrique entre eux ne dépend que du rayon de la sphère, et non de leur position (figure 4) :

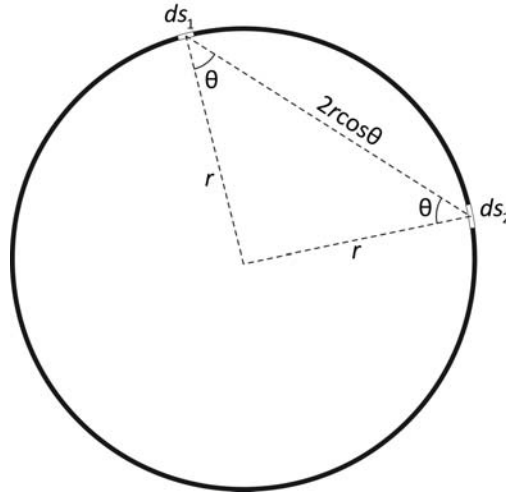


Figure 4 – Etendue géométrique entre deux éléments d'aire ds_1 et ds_2 dans la sphère intégrante.

$$d^2G = \frac{ds_1 \cos\theta \times ds_2 \cos\theta}{(2r \cos\theta)^2} = \frac{ds_1 ds_2}{4r^2}$$

Comme le revêtement est Lambertien, tout élément d'aire ds_1 émet la même luminance L dans toutes les directions ; ainsi, tout élément d'aire ds_2 reçoit le même flux $d^2F = Ld^2G$ et l'éclairement $dE = Ld^2G / ds_2 = Lds_1 / 4r^2$ est le même en tout point de la sphère.

Une autre propriété intéressante de la sphère est de multiplier le flux éclairant sa surface à cause des réflexions multiples se produisant à l'intérieur de la cavité. Celle-ci a une aire $A_s = 4\pi r^2$ mais à cause des orifices qui en composent une fraction f , l'aire du revêtement, d'albedo ρ , est $4\pi r^2(1-f)$.

Appelons F_i le flux entrant dans la sphère. Un cache empêche ce flux d'atteindre directement le détecteur ; on suppose que ce flux n'éclaire aucun trou. Le flux réfléchi $F_0 = \rho F_i$ est diffusé sur toute la paroi de la sphère ; le flux réfléchi $F_1 = \rho(1-f)F_0$ est à nouveau diffusé sur toute la paroi, tout comme le flux réfléchi $F_2 = \rho(1-f)F_1$ et ainsi de suite. La paroi reçoit donc un flux total

$$F = \sum_{k=0}^{\infty} F_k = \sum_{k=0}^{\infty} \rho^k (1-f)^k F_0 = \frac{\rho F_i}{1 - \rho(1-f)} \quad (10)$$

et on a montré que l'éclairement est le même en tout point de la sphère :

$$E = \frac{F}{4\pi r^2} = \frac{F_i}{4\pi r^2} \cdot \frac{\rho}{1 - \rho(1-f)} \quad (11)$$

Le terme $\rho / (1 - \rho(1-f))$ est appelé facteur multiplicateur de la sphère. Il est responsable du fait que le flux total reçu par les parois de la sphère est bien plus grand que celui flux émis par la source, à cause des réflexions multiples. Dans le cas d'une sphère idéale où $\rho = 1$ et $f = 0$, il tend vers l'infini. En réalité, il est généralement compris entre 10 et 30 selon les valeurs de ρ et f .

La luminance réfléchie, qui serait par exemple mesurée avec un luminancemètre, est :

$$L = \frac{\rho E}{\pi} = \frac{F_i}{4\pi^2 r^2} \cdot \frac{\rho^2}{1 - \rho(1-f)} \quad (12)$$

Notons que ce raisonnement est également valable pour un flux monochromatique ou, si on distingue chaque bande spectrale, pour tout flux spectrique. Il s'applique également aux flux visuels.

Lampe étalon

La lampe a été caractérisée pour une valeur nominale d'alimentation de 2.600 A, dans une pièce à température ambiante de 21 ± 2 °C pour une répartition spectrale allant de 350 à 1050 nm (cf. fichier **Spectra.xls** et figure 5). Pour son alimentation électrique, on dispose d'une alimentation stabilisée AL 924A de Elc et d'un multimètre CA5273 de Chauvin Arnoux. *Attention de toujours placer les boutons de l'alimentation au minimum avant son allumage !*

Question 2 : A partir des valeurs du flux spectrique de la lampe étalon fournies dans le fichier **Spectra.xls**, calculer: le flux énergétique total F_e , le flux visuel F_v , l'efficacité lumineuse K et les valeurs de chromaticité x , y . Comparer ces valeurs à celles fournies par le constructeur (**CalibratedLamp_Datasheet.pdf**). Commenter.

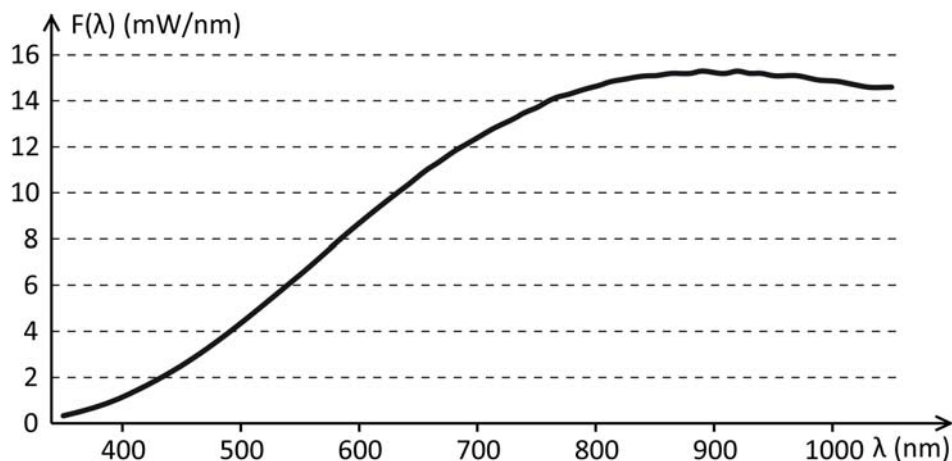


Figure 5 – Flux spectrique de la lampe étalon.

Photodiode

Pour les mesures de flux, nous disposons d'une photodiode en silicium DET10 de Thorlabs, de surface active $A_p = 0.8 \text{ mm}^2$. Comme toute photodiode en silicium, elle est plus sensible dans l'infrarouge. Sa réponse spectrale, tracée dans la figure 6 (cf. **Spectra.xls**), étant très éloignée de la réponse spectrale de l'œil ne permet pas de mesurer directement un flux visuel. Pour obtenir une réponse spectrale plus proche de $V(\lambda)$, on utilise un filtre vert dont le facteur spectral de transmission $T_f(\lambda)$ est donné dans le fichier **Spectra.xls**. La réponse de la photodiode avec filtre est tracée dans la figure 6.

IMPORTANT : Penser à l'allumer et à l'éteindre pour économiser la pile qui se trouve à l'intérieur ! L'interrupteur a la forme d'une petite baguette métallique et se trouve au dos de la photodiode.

Question 3 : a) Exprimer l'éclairement spectrique $E_p(\lambda)$ sur la photodiode, puis le flux spectrique $F_p(\lambda)$ qu'elle reçoit ainsi que le flux visuel F_{vp} , en fonction de l'albedo spectrale $\rho(\lambda)$ et le rayon r de la sphère, la fraction d'aire f occupée par les ports et le flux spectrique $F_e(\lambda)$ de la lampe étalon.

b) A partir des spectres donnés dans le fichier **Spectra.xls**, et en supposant que les ports 3 et 6 sont ouverts pour le calcul de f , calculer la valeur théorique du flux visuel F_{vp} reçu par la photodiode sans filtre.

c) En déduire d'après l'équation (4) la valeur théorique de courant i_{th} que devrait mesurer le pico-ampèremètre et le coefficient $\sigma_{th} = i_{th} / F_{vp}$.

d) Reprendre la question c) pour la photodiode avec filtre.

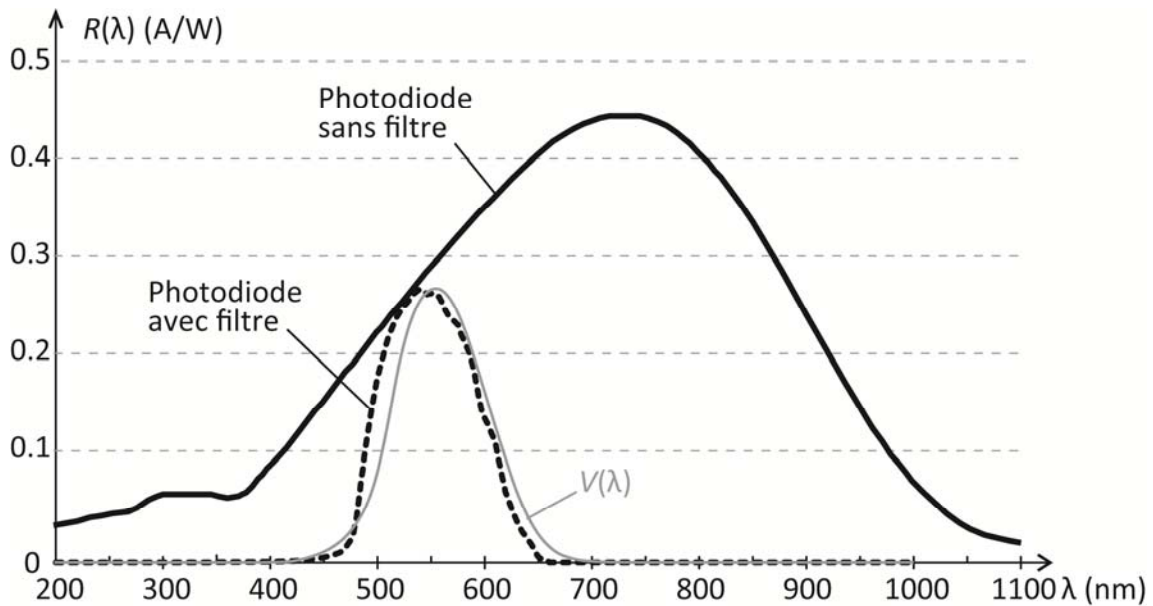


Figure 6 – Réponse spectrale de la photodiode sans et avec filtre vert, et pour comparaison, sensibilité spectrale de l'œil $V(\lambda)$.

Luminancemètre

Le luminancemètre est un instrument portatif permettant de mesurer la luminance visuelle d'une surface dans une direction donnée ; l'aire dont la luminance est mesurée est définie par un cercle visible dans l'oculaire (bien faire la mise au point avec la bague de l'objectif). Son détecteur précédé d'un filtre a une réponse très proche de $V(\lambda)$ (voir documentation p. 35) et mesure donc un flux visuel.

4. Etalonnage de la sphère

On veut vérifier la valeur de l'albedo moyenne de la sphère. Pour cela, placer la lampe étalon alimentée précisément à 2,6 A dans le port n°3 et fermer tous les autres ports avec un cache blanc, sauf le n°1.

Question 4 : a) En supposant l'albedo de la sphère constante sur le spectre visible, exprimer la luminance visuelle en fonction : du flux visuel F_v de la lampe, du rayon r de la sphère et de la fraction f occupée par les ports. En déduire l'expression de l'albedo ρ en fonction de L_v , F_v , r et f .

b) Avec le luminancemètre, mesurer la luminance visuelle L_v à travers le port n°1. Estimer l'aire des ports non obturés et le facteur f correspondant (ne pas oublier le port 3 contenant la lampe étalon). Donner une valeur expérimentale de l'albedo de la sphère (albedo moyenne sur tout le visible). Répéter cette opération dans différentes configurations de ports ouverts/fermés.

5. Etalonnage de la photodiode

Fermer le port n°1 et plaquer la photodiode contre le port n°6. Mesurer le courant issu de la photodiode avec le pico-ampèremètre. Ensuite, placer le filtre vert entre la photodiode et le port n°6 en tachant de minimiser les pertes lumineuses. Mesurer à nouveau le courant issu de la photodiode avec le pico-ampèremètre.

Question 5 : a) Exprimer le coefficient σ défini par l'équation (5) en fonction du rayon r et de l'albedo moyenne ρ de la sphère, de la fraction f , de l'aire A_p de la photodiode, du courant i issu de la photodiode et du flux visuel F_v émis par la lampe.

b) Mesurer le courant i issu de la photodiode *sans filtre* et estimer l'aire des ports non obturés et f . En déduire une valeur expérimentale σ_m à comparer à la valeur théorique de σ_{th} calculée dans la question 3. Montrer que la valeur de f influe sensiblement sur l'écart entre σ_{th} et σ_m (on surestime f on considérant que les trous sont parfaitement noirs alors que les éléments placés derrière les ports ouverts réfléchissent de la lumière. On pourra retenir la valeur de f qui minimise cet écart.

c) Mesurer le courant i issu de la photodiode *avec filtre* et en déduire la valeur expérimentale de σ_m . Expliquer pourquoi celle-ci est notablement plus basse que la valeur théorique de σ_{th} . Comment pourrait-on corriger la valeur de σ_m avec filtre ?

6. Etalonnage du spectrophotomètre

Le spectrophotomètre USB-650 d'Ocean Optics est un spectromètre à fibre calibré en longueur d'onde permettant de mesurer le spectre de signaux lumineux entre 350 et 1000 nm. En revanche, il n'est pas calibré en amplitude, c'est-à-dire que sa réponse spectrale, non uniforme, n'est pas connue. Pour la déterminer, nous utilisons le flux spectrique connu de la lampe étalon.

Démarrer l'ordinateur et lancer le logiciel SpectraSuite (icône sur le bureau). Placer l'embout de la fibre au port n°6 à la place de la photodiode. Dans le logiciel, ajuster le temps d'exposition de sorte que le spectre affiché, exprimé en unités arbitraires, ne soit pas saturé. Pour enregistrer un spectre, cliquer sur l'icône enregistrer (figurée par une disquette), et préciser le dossier et le nom d'enregistrement du fichier, en choisissant le format de fichier « Tab separated ». Un fichier .txt sera enregistré dans le dossier choisi, qui peut ensuite être copié dans Excell.

Question 6 : Enregistrer le spectre $S_e(\lambda)$ de la lampe étalon. Déterminer la courbe spectrale du spectromètre $R_s(\lambda) = F_e(\lambda) / S_e(\lambda)$ (en $\text{W}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{counts}^{-1}$) où $F_e(\lambda)$ désigne le spectre par la lampe étalon donné dans le fichier **spectra.xls**. Tracer la courbe de $R_s(\lambda)$.

7. Analyse d'une source inconnue

On souhaite à présent étudier une LED blanche, que l'on placera devant le port n°5 à la place de la lampe étalon. *La LED s'allume par un interrupteur qui se trouve sur son fil d'alimentation. On ignorera la perte de flux due au fait que le faisceau émis est plus large que le port. On peut surélever légèrement la lampe pour l'aligner avec le port.*

Dans un premier temps, on souhaite mesurer le flux visuel F_{vs} émis par la LED. Deux méthodes sont possibles, l'une utilisant la photodiode (le port n°1 est alors bouché), l'autre le luminancemètre (mesurant la luminance à travers le port n°1 qui est alors ouvert).

Question 7 : a) exprimer la luminance L émise en tout point de la sphère en fonction de l'albedo moyenne ρ déterminée dans la question 4, le flux visuel F_{vs} émis par la source, la fraction f et le rayon r de la sphère. En déduire l'expression de F_{vs} en fonction de L , r , ρ et f . Estimer f , mesurer L avec le luminancemètre et donner une valeur de F_{vs} .

b) Exprimer le flux visuel F_{vp} reçu par la photodiode, puis le courant i , en fonction de F_{vs} , ρ , f , r , l'aire A_p de la photodiode et le coefficient σ pour la photodiode avec filtre calculé dans la question 5. En déduire l'expression de F_{vs} en fonction de F_{vp} , r , ρ , f , A_p , σ et i . Estimer f , mesurer le courant issu de la photodiode avec filtre et donner une deuxième valeur expérimentale de F_{vs} . Commenter l'écart entre les deux méthodes.

c) A partir de la valeur de flux visuel qui vous semble la plus juste, sachant que la LED est alimentée en 5V, 1A, calculer son l'efficacité lumineuse K .

On souhaite à présent déterminer les valeurs de chromaticité de la LED à partir de son spectre.

Question 8 : a) Enregistrer le spectre $S_{LED}(\lambda)$ de la LED *sans modifier le temps d'exposition* utilisé avec la lampe étalon. Calculer le spectre calibré de la LED en utilisant la courbe de calibrage spectral du spectromètre obtenu dans la question 7. Tracer ce spectre.

b) Calculer ses valeurs de chromaticité (x, y).

BONUS : Vous pourrez placer le point dans le diagramme de chromaticité et en déduire la longueur d'onde dominante et la pureté par rapport à l'illuminant D65.

8. Récapitulatif des manipulations et mesures.

Démarrage : branche la multiprise. Allumer l'ordinateur, le picoampèremètre, le multimètre et l'alimentation de la lampe étalon.

Placer la lampe étalon dans le port 3. L'alimenter à 2.600 A.

- Q4 : Avec le luminancemètre, mesurer la luminance visuelle L_v à travers le port 1.

Refermer le port 1. Placer la photodiode contre le port 6. Allumer la photodiode.

- Q5.b : Mesurer le courant issu de la photodiode avec le pico-ampèremètre.

Placer le filtre vert entre la photodiode et le port 6.

- Q5.c : Mesurer le courant issu de la photodiode avec le pico-ampèremètre.

Éteindre la photodiode. Sur l'ordinateur, lancer le logiciel SpectraSuite, et placer l'embout de la fibre contre le port 6.

- Q6 : Enregistrer le spectre de la lampe étalon.

Eteindre l'alimentation de la lampe étalon et la retire du port 3 (*en la posant très délicatement : la lampe est fragile et coûteuse !*). Placer la LED contre le port 3 et l'allumer. Ouvrir le port 1.

- Q7.a : Mesurer la luminance visuelle avec le luminancemètre à travers le port 1.

Refermer le port 1. Rallumer la photodiode et la placer avec le filtre contre le port 6.

- Q7.b : Mesurer le courant issu de la photodiode.

Eteindre la photodiode. Retirer la photodiode et le filtre.

- Q8 : Placer le spectromètre contre le port 6. Enregistrer le spectre de la LED.

Fin : Éteindre l'ordinateur, le picoampèremètre, le multimètre et l'alimentation de la lampe étalon. Débrancher la multiprise.