Travaux dirigés

Détecteurs optique

Exercice 1. Grandeurs fondamentales de la photométrie

1. Quelle est la gamme de longueur d'onde de la lumière dans le visible? En déduire son domaine de fréquence.

2. La constante de Planck h a pour valeur $6{,}62{\cdot}10^{-34}$ uSI et la charge de l'électron e a pour valeur $1{,}6{\cdot}10^{-19}$ uSI. En déduire l'énergie d'un photon, en eV (électron Volts), appartenant aux fréquences visibles.

3. Une source supposée ponctuelle et isotrope emmet un flux lumineux total (dans tout l'espace) égal à 1257 lm. Calculer l'éclairement que produit la source sur un écran situé à 10 m. Quel est alors l'éclairement si on focalise tout le flux lumineux émis dans un cône d'angle d'arc de 15° ?

4. Une source ponctuelle envoie un flux lumineux dans tout l'espace. L'intensité lumineuse est de 950 lm/sr. Quel serait le flux reçu par une petite surface de 1 cm^2 placée à 20 mètres de la source, perpendiculaire aux rayons lumineux ? Quel serait le flux si la normale de la surface était inclinée de 30° par rapport aux rayons incidents ?

5. Evaluer la luminance du soleil sachant que l'éclairement énergétique reçu sur la surface de la terre est de 500 W/m^2, l'efficacité lumineuse de l'œil à la lumière du soleil est d'environ 91 lm/W. Nous supposons que le soleil est vu sous un solide de $\frac{\pi}{4}10^{-4}$ sr (correspondant à un angle d'un cône d'angle de 0.5 degré). Dans ce calcul on néglige aussi l'atténuation de la lumière par l'atmosphère.

Exercice 2. Énergie lumineuse captée par une lentille

On cherche à déterminer l'énergie lumineuse captée par une lentille. On suppose un système optique constitué d'une lentille convergente de rayon $R = D/2$, de focale f et ayant un taux de transmission τ, illuminée par une surface Lambertienne S_e de luminance L située à une distance l. Un surface réceptrice S_r placée au plan image situé à une distance a du plan focal de la lentille sert de détecteur pour cet éclairement.

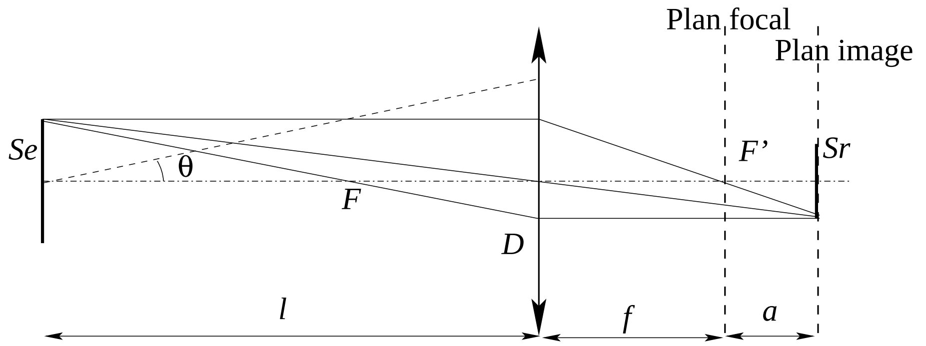

Figure 1: Schéma équivalent de la photodiode.

1. Calculer le flux énergétique incident sur la surface S_r.
2. Calculer l'éclairement E_{sr} reçu par la surface S_r. Dans l'hypothèse $l \gg D$, donner l'expression simplifiée de E_{sr}.

Exercice 3. Lampe halogène

Les caractéristiques d'une lampe halogène sont : $P_{electrique} = 500$ W ; $P_{rayonnee} = 400$ W ; $P_v = 8000$ lm. Cette source suit :

- la loi de Stefan : $P_{rayonnee} = \sigma S T^4$ avec $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ W.m^{-2}·K^{-4}, où S est la surface de la source.
- la loi de Wien : $\lambda_{max} T = 2,89810^{-3}$ m.K, où λ_{max} est la longueur d'onde du maximum d'émission de la source

1. Calculer son efficacité lumineuse et l'efficacité électrique.
2. Le filament a pour longueur $l = 5$ cm et son diamètre est $d = 0,2$ mm. Calculer la température du filament lorsque la lampe éclaire.
3. Calculer la longueur d'onde du rayonnement émis en plus grande quantité. Dans quel domaine se situe-t-il ?
4. Cette lampe considérée comme ponctuelle est utilisée dans un luminaire qui répartit uniformément la lumière dans le demi-espace supérieur (éclairage indirect par réflexion sur le plafond). Calculer l'intensité lumineuse caractérisant cette source.

Exercice 4. Cellule photoélectrique

On éclaire une cellule photoélectrique avec un faisceau de lumière monochromatique de longueur d'onde 526 nm et de puissance 0,25 W.

1. Calculez la vitesse des électrons photo-émis, si le travail d'extraction vaut 2,2 eV.
2. Quelle est l'intensité du courant de saturation, si le rendement quantique de la cellule vaut 0,8% ?

On donne : $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C ; $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ J.s ; $c = 3 \cdot 10^8$ m/s ; $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg.

Exercice 5 : Cathode d'une cellule photoélectrique

Une cathode d'une cellule photoélectrique est caractérisée par un travail d'extraction de 2,5 eV. On l'éclaire avec de la lumière monochromatique de longueur d'onde 400 nm. Calculez l'énergie cinétique des électrons photoémis, ainsi que le tension d'arrêt. On applique une différence de potentiel $V_A - V_C = 10$ V entre cathode et anode. Calculez l'énergie cinétique des électrons lors de leur arrivée sur l'anode. Pour cette tension, la cellule est saturée ($I = I_S$). Sachant que la puissance du faisceau lumineux vaut 400 mW et le courant de saturation 50 mA, calculez le rendement de la cellule.

Exercice 6 : Photodiode

Une photodiode est destinée à mesurer un flux lumineux variable, $\Phi(t) = \Phi_0 + \Phi_1 \sin(\omega t)$ dans une zone inaccessible, située à 1 km de l'expérimentateur muni d'un ordinateur. Un câble sera donc utilisé pour transmettre le signal.

On attend des variations du flux lumineux avec une fréquence maximale de $f_{max} = 100$ kHz et une amplitude maximale $\Phi_{1max} = 0.1$ mW. La valeur maximale de la composante continue du flux est estimée à $\Phi_{0max} = 1$ mW.

Le schéma équivalent de la photodiode et de son conditionnement est présenté sur la figure 2. La sensibilité statique de la photodiode est $K = I/\Phi = 0.35$ A/W et sa capacité propre est $C_L = 80$ pF.

1. Est-ce un capteur actif ou un capteur passif ?
2. Déterminer la fonction de transfert du montage $S(f) = V_L/\Phi$.
3. Déterminer le gain $G(f) = |S(f)|$ maximal du circuit et la fréquence de coupure en fonction de K, R_L et C_L. On rappelle que la fréquence de coupure correspond à une baisse du gain d'un facteur $\sqrt{2}$ par rapport à sa valeur maximale.
4. Quelle doit être la valeur de la résistance R_L pour obtenir une fréquence de coupure du capteur qui soit 2 fois la fréquence maximale du signal utile ?
5. Avec cette valeur de résistance quelle est le gain (sensibilité) statique du capteur? Quelle est la valeur du gain dynamique pour $f = f_{max}$?
6. Exprimer la tension V_L en fonction du flux reçu par le capteur pour un signal de fréquence de 1/10 de la fréquence de coupure.

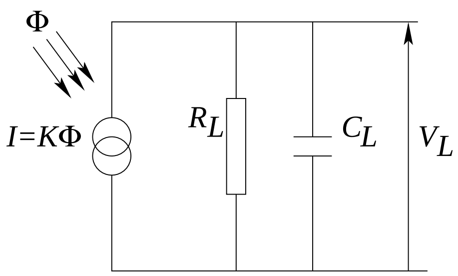

Figure 2: Schéma équivalent de la photodiode.

Exercice 7: Caractérisation d'émmision d'une source

1. On considère une source de lumière isotrope rayonnant une puissance P_0. Répondre aux questions suivantes:
   (a) Quelle est la forme de l'indicatrice d'émission de cette source? Justifier la réponse.
   (b) Quelle est l'intensité I rayonnée par cette source (en W·sr^{-1})?
   (c) Quel est l'éclairement E reçu à distance d?

2. On considère une source comme une sphère de rayon R portée à la température T, émettant comme un corps noir.
   (a) Quelle est l'émittance M de la source intégrée sur toutes les longueurs d'onde du spectre?
   (b) Exprimer la puissance rayonnée P_0 en fonction de R et T.
   (c) Donner la relation entre l'émittance M de la source et l'éclairement E à la distance d.
   (d) A quelle longueur d'onde λ_{max} la source rayonne-t-elle le plus d'énergie?

Exercice 8: Rendement d'un détecteur

Pour un mono-détecteur, on donne les mesures suivantes de rendement quantique en fonction de la longueur d'onde:

$\lambda(\mu m)$	0.8	1.0	2.2	3.0	3.6	4.2	5.1
η	0.1	0.5	0.6	0.75	0.7	0.5	0.2

1. Tracer sur un graphe la variation de la réponse en courant $R_\lambda(\lambda)$ de ce détecteur, échelle en x: 2 cm/μm, échelle y: 2 cm/A·W^{-1}. En détuire:
   (a) Domaine de sensibilité en longueur d'onde du détecteur utilisé.
   (b) La longueur d'onde au pic λ_p.
   (c) La réponse en courant au pic $R_\lambda(\lambda_p)$.
   (d) La longueur d'onde de coupure λ_c du détecteur.
2. Tracer sur le même graphe la réponse en courant idéale d'un détecteur de rendement quantique unité.

   Comparer vos réponses aux performance de la photodiode InGaAs-PIN G3476-05 du catalogue *Hamamatsu* (Réponse en courant de 0.95 A/W au pic à 1.55 μm, diamètre de la zone active $\phi = 0.05$ cm, voir la fiche technique en annexe). Quelle est sa longueur d'onde au pic et son rendement quantique à cette longueur d'onde?

   Montrer que le NEP (8×10^{-15} W·Hz$^{1/2}$ et la détectivité D^* annoncés à λ_p par le constructeur (5×10^{12} cm.Hz$^{1/2}$/W) sont bien comparables.

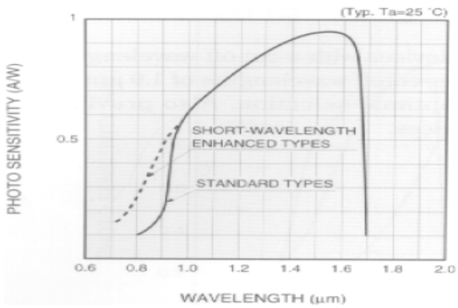

Figure 3: Sensibilité du détecteur InGaAs-G3476-05 fourni par le constructeur.

Exercice 9: Filtre

On observe à travers un filtre dont la courbe de transmission est donnée sur la figure -a Une source dont la courbe d'émission P_λ est donnée sur la figure -b. On ne se préoccupe pas du montage optique utilisé.

1. Quelle est la courleur de la source vue à l'oeil nu? Que devient la couleur de la source après passage dans le filtre?
2. Calculer la puissance reçue par le détecteur après le passage dans le filtre.
3. Si la réponse du détecteur est $R = 5 \times 10^5$ V/W, et le bruit $\sigma = 6$ μV rms, quel est le rapport sur bruit obtenu?
4. Quel est le NEP du détecteur?
5. Le détecteur a une constante de temps $\tau = 10$ ms, calculer la réponse obtenue si on observe la source derrière un modulateur de 10 pales tournant à $n = 100$ tours/min.

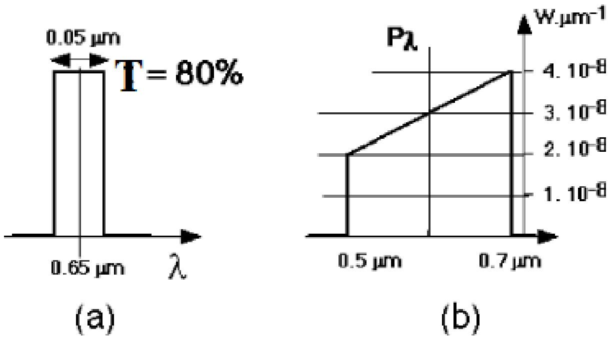

Figure 4: Filtre.

Travaux dirigés

Physique - Détecteurs

Corrigé type

Exercice 1. Grandeurs fondamentales de la photométrie

1. Les longueurs d'onde dans le visible :

$$\lambda_{min} = 400 \text{ nm}, \qquad \lambda_{max} = 800 \text{ nm}$$

La relation entre la fréquence et la longueur d'onde : $\nu = \frac{c}{\lambda}$ avec $c = 3 \cdot 10^8$ m/s. On a donc

$$\nu_{min} = \frac{c}{\lambda_{max}} = 3,75 \cdot 10^{14} \text{ Hz et } \nu_{max} = \frac{c}{\lambda_{min}} = 7,5 \cdot 10^{14}\text{Hz}$$

2. On sait $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ J.s, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C, $\lambda_{min} = 400$ nm et $\lambda_{max} = 800$ nm. On calcule

- L'énergie d'un photon en Joules:

$$E_{max} = \frac{hc}{\lambda_{min}} = 5 \cdot 10^{-19} \text{ J}, \; E_{min} = \frac{hc}{\lambda_{max}} = 2,5 \cdot 10^{-19}\text{J}$$

- L'énergie d'un photon en eV:

$$E_{max}(eV) = \frac{E_{max}}{e} = 3,1 \text{ eV}, \; E_{min}(eV) = \frac{E_{min}}{e} = 1,55\text{eV}$$

3. Flux lumineux : $F_v = 1257$ lm

- Méthode 1: Par la définition, l'éclairement :

$$E_v = \frac{F_v}{A} = \frac{F_v}{4\pi d^2} = 1\text{lux}$$

- Méthode 2: Intensité lumineuse : $I_v = \frac{dF_v}{d\Omega}$, $dF_v = I_v \cdot d\Omega$ et $dA = R^2 d\Omega$.

$$E_v = \frac{dF_v}{dA} = \frac{I_v}{d^2}$$

Alors $I_v = \frac{F_v}{4\pi} = 100$lm/sr, donc l'éclairement :

$$E_v = \frac{I_v}{d^2} = 1 \text{ lux}$$

Si tout flux est focalisé dans un cône:

$$E_{v,15^\circ} = \frac{F_v}{d^2 \cdot 2\pi(1 - \cos\theta)} = E_v \frac{2}{1 - \cos 15^\circ} = 58.7\text{lux}$$

4. L'intensité lumineuse : $I_v = \frac{dF_v}{d\Omega} = \frac{F_v}{\Omega}$=950 lm/sr.
   L'éclairement à 20 m:
   $$E_v = \frac{dF_v}{dA} = \frac{I_v d\Omega}{d^2 d\Omega} = \frac{I_v}{d^2} = 2,375 \text{ lux}$$
   et le flux reçu :
   $$dF_v = E_v dA = 2,4 \times 10^{-4} \text{ lm}$$
   L'éclairement à 20 cm:
   $$E_v = \frac{I_v}{d^2} = \frac{950}{0,2^2} = 2,375 \cdot 10^4 \text{ lux}$$
   Le flux reçu :
   $$F_v = E_v dA = 2,4 \text{ lm}$$
   Flux reçu lorsque le détecteur est incliné à 30° :
   $$F_v(30°) = F_v \cos 30° = 2,05 \times 10^{-4} \text{ lm (à 20 m)}, \qquad 2,05 \text{ lm (à 20 cm)}$$
5. La définition de la luminance :
   $$L = \frac{dI}{dA\cos\theta} = \frac{d}{dA\cos\theta}\frac{dF}{d\Omega} = \frac{d}{d\Omega\cos\theta}\frac{dF}{dA} = \frac{dE}{d\Omega\cos\theta}$$
   Par la définition de l'angle solide on a:
   $$d\Omega_r = \frac{dA_e}{d^2} \text{ et } d\Omega_e = \frac{dA_r}{d^2},$$
   ainsi on a
   $$dA_e \cdot d\Omega_e = dA_r d\Omega_r$$
   et on en déduit que
   $$L_s = \frac{dE_t}{d\Omega_s}$$
   La luminance énergétique du soleil ($\theta = 0°$):
   $$L_e = \frac{500}{\frac{\pi}{4}10^{-4}} = 0,63 \cdot 10^8 \text{ W/(sr.m}^2\text{)}$$
   La luminance visuelle du soleil :
   $$L_v = L_e V = 56.6 \cdot 10^8 \text{ lx.sr}^{-1} \text{ (ou cd.m}^{-2}\text{)}$$

Exercice 2: Énergie lumineuse captée par une lentille

1. Source Lambertienne : $I = I_0 \cos\theta$
   Sachant que l'angle solide d'un cône d'angle θ vaut $\Omega = 2\pi(1-\cos\theta)$, $\Rightarrow d\Omega = 2\pi\sin\theta d\theta$ et $I = \frac{dF}{d\Omega}$, le flux total reçu :
   $$F = \int_\Omega I(\theta)d\Omega = \int_0^{\theta_{max}} I_0\cos\theta \cdot 2\pi\sin\theta d\theta = \pi I_0 \sin^2\theta_{max}$$
   Alors $\sin\theta_{max} = \frac{D/2}{\sqrt{l^2+D^2/4}}$ et $I_0 = LS_e$
   Ce flux est restreint sur S_r avec une atténuation τ:
   $$F_r = \pi\tau LS_e \frac{D^2}{4l^2+D^2}$$

2. Eclairement sur S_r ($l \gg D$):

$$E_{sr} = \frac{F_r}{S_r} = \pi\tau L \frac{S_e}{S_r}\frac{D^2}{4l^2 + D^2} \simeq \pi\tau L \frac{S_e}{S_r}\frac{D^2}{4l^2}$$

Or $\frac{S_e}{S_r} = \frac{(f+a)^2}{l^2} \simeq \left(\frac{f}{l}\right)^2$, on obtient enfin:

$$E_{sr} = \pi\tau \frac{L}{4}\frac{D^2}{f^2}$$

Exercice 3. Lampe halogène

Puissance électrique : $P = 500$ W
Flux énergétique (rayonné) : $P_e = 400$ W
Flux visuel : $F_v = 8000$ lm

1. Efficacité lumineuse : $K = \frac{8000}{400} = 20$ lm/W
   Efficacité électrique : $\epsilon = \frac{400}{500} = 80\%$
2. La surface du filament : $S = \pi d L$
   La température du filament selon la loi de Stefan :
   $T = \left(\frac{P}{\sigma S}\right)^{1/4} = 3871$ K
3. La longueur d'onde d'émission maximale selon la loi de Wien :
   $\lambda_{max} = \frac{2898}{T} = 0,749\ \mu$m (dans le visible)
4. Intensité lumineuse : $I_v = \frac{F_v}{\Omega} = \frac{8000}{2\pi} = 1273$ cd

Exercice 4: Cellule photoélectrique

1. L'énergie cinétique de l'électron excité par un photon :

$$E_c = h\nu - W_s = \frac{1}{2}m_e v_e^2$$

   On sait $W_s = 2,2$ eV$= 2,2 \times 1,6\ 10^{-19} = 3,52\ 10^{-19}$ J
   $h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,62\cdot 10^{-34}\times 3\cdot 10^6}{526\cdot 10^{-9}} = 3.78\cdot 10^{-19}$ J.
   On a donc :

$$v_e = \sqrt{\frac{2(h\nu - W_s)}{m_e}} = 0,24\cdot 10^6 \text{ m/s}$$

2. Courant de saturation:
   Le nombre de photons émis par le faisceau lumineux : $n_p = \frac{P}{h\nu} = 6,62\cdot 10^{17}$ photons/s.
   Le nombre d'électrons émis : $n_e = n_p\eta = 6,62\cdot 10^{17}\times 0,008 = 5,3\cdot 10^{15}$ électrons/s.
   Le courant de saturation : $I_{sat} = n_e e = 8,4\cdot 10^{-4}$ A=0,84 mA.

Exercice 5: Rendement d'une cellule photoélectrice

1. L'énergie d'un photon: $E_p = \frac{hc}{\lambda} = 4.965 \cdot 10^{-19}$ J=3.1 eV.
   L'énergie d'électron photoémis : $E_e = E_p - W_s = 3,10 - 2,5 = 0,6$ eV.
   Potentiel d'arrêt : $U_a = \frac{E_c}{e} = 0,6$ V.
2. L'énergie cinétique d'un électron arrivé sur l'anode :
   $E_c = E_e + eUV = 10,6$ eV$= 1,7 \cdot 10^{-18}$J.
3. Le nombre de photons par seconde: $n_p = \frac{P}{h\nu} = \frac{400 \cdot 10^{-3}}{4.965 \cdot 10^{-19}} = 8.06 \cdot 10^{17}$ photons/seconde.
   Le nombre d'électrons par seconde: $n_e = \frac{I_{sat}}{e} = \frac{50 \cdot 10^{-3}}{1.6 \cdot 10^{-19}} = 3.25 \cdot 10^{17}$ électrons/seconde.
   Le rendement :
   $$\eta = \frac{n_e}{n_p} = \frac{3.25}{8.06} = 38.8\%$$

Exercice 6: Photodiode

1. C'est un capteur actif : transformation de l'énergie lumineuse en énergie électrique par junction PN dans la photodiode.
2. Un condensateur est équivalent à une résistance complex de $R_C = 1/j\omega C_L$, la résistance totale de deux résistances en parallèle
   $$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$
   Donc on a
   $$V_L = I \frac{R_L/j\omega C_L}{R_L + 1/j\omega C_L} = K\Phi \frac{R_L}{1 + j\omega R_L C_L}$$
   Or on sait $\omega = 2\pi f$, donc la fonction de transfert:
   $$S(f) = \frac{V_L}{\Phi} = \frac{KR_L}{1 + j2\pi f R_L C_L}$$
3. Le gain:
   $$G(f) = |S(f)| = \frac{KR_L}{\sqrt{1 + (2\pi f R_L C_L)^2}}$$
   Évidemment le gain est maximal lorsque $f = 0$:
   $$G_{max} = KR_L$$
   La fréquence de coupure f_c est obtenu par:
   $$G(f_c) = \frac{G_{max}}{\sqrt{2}} = \frac{KR_L}{\sqrt{2}} = \frac{KR_L}{\sqrt{1 + (2\pi f_c R_L C_L)^2}}$$
   d'où
   $$f_c = \frac{1}{2\pi R_L C_L}$$

4. On voit que la fréquence de coupure dépend de R_L et C_L, on veut maintenant que la fréquence de coupure est $f'_c = 2f_{max} = 200$ kHz, donc

$$R_L = \frac{1}{2\pi f_c C_L} = \frac{1}{2\pi 200 \times 10^3 \times 80 \times 10^{-12}} \simeq 10k\Omega$$

5. Gain (sensibilité) statique correspond à $G(f = 0)$, donc

$$G_{stat} = KR_L = 0,35 \times 10^3 = 3500V/W$$

Sensibilité dynamique correspond à $G(f_{max})$ donc

$$G_{dyn} = \frac{KR_L}{\sqrt{1 + (f_{max}/f'_c)^2}} = \frac{KR_L}{\sqrt{1 + 1/4}} = 3500\sqrt{\frac{4}{5}} = 3130V/W$$

6. $\Phi = \Phi_{0max} + \Phi_{1max}\sin(2\pi ft)$
   $V_0 = G_{stat}\Phi_{0max} = 3500 \times 0,001 = 3,5$ V
   $V_1 = G_{dyn}(20kHz)\Phi_{1max} = \frac{3500\times 0,1\times 10^{-3}}{\sqrt{1+(1/10)^2}} = 0,35$ V
   $V = 3,5$ V$+0,35\sin(2\pi ft)$.

Exercice 7: Caractérisation d'émmision d'une source

1. Source isotrope:
   (a) Source isotrope $\Rightarrow$ l'indicatrice d'émission est constante: $I(\theta) = 1$, car le rayonnement est homogène dans toutes les directions.
   (b) P_0 rayonnée dans 4π stéradians donne une intensité $I = P_0/4\pi$ (W/sr).
   (c) A distance d, l'éclairement est $E = P_0/(4\pi d^2)$ (W/m^2)

2. Source sphérique:
   (a) L'emittance (exitance) de la source vaut $M = \sigma T^4$.
   (b) La puissance totale rayonnée par la source vaut $P_0 = 4\pi R^2\sigma T^4$.
   (c) A distance d, l'éclairement vaut donc $E = P_0/4\pi d^2 = MR^2/d^2$.
   (d) La source rayonne comme corps noir, elle émet au maximum pour $\lambda_{max} \approx 3000/T$(K)

Exercice 8: Rendement d'un détecteur

1. La relation entre la réponse en courant et le rendement quantique est: $R = \eta \cdot e\lambda/hc$. Les courbes de $\eta(\lambda)$ et $R_\lambda(\lambda)$ correspondantes sont indiquées sur la figure. Pour λ exprimée en micron, cette relation donne $R \approx 0.8\eta\lambda$ (A/W). Cela donne une droite 0.8λ qu'il faut tracer comme réponse théorique d'un détecteur de rendement unité.
   (a) On détermine le domaine de sensibilité à partir de la zone où $R_\lambda > R(max)/2 \approx 1.2$ A/W, ce qui correspond environ au domaine $2-5$ μm (longueur d'onde de coupure $\approx 5\mu$m).
   (b) La longueur d'onde au pic vaut $\approx 3.6\mu$m.
   (c) La réponse max est de l'ordre de 2.4 A/W.

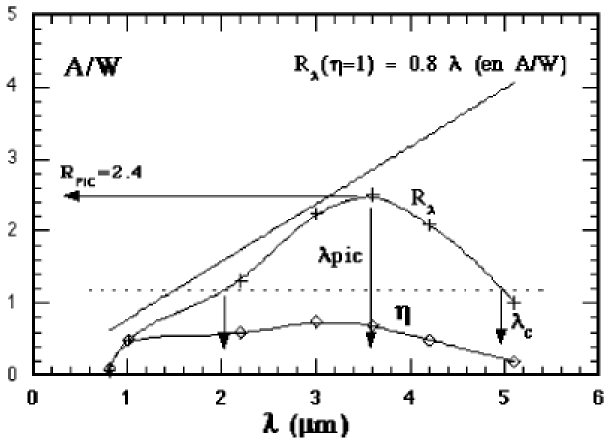

Figure 5: Tracé et mesures pour exercice Rendement.

(d) La longueur d'onde de coupure est $\lambda_c = 5.1\ \mu$m.

2. $R_\lambda(\lambda)$ est une droite: $R_\lambda(\eta = 1) = \frac{e\lambda}{hc} = 0.8\lambda$ (A/W) (λ en μm). Le détecteur du commerce considéré a une réponse en courant de 0.95 A/W au pic à 1.55 μm. ce qui correspond à un rendement quantique de $\eta = 0.95/(0.8 \times 1.55) = 77\%$ environ, ce qui est très correct. La surface du détecteur est $A = \pi 0.05^2/4 \approx 1.96 \times 10^{-3}$ cm^2. $D* = \sqrt{A}/NEP$. Pour $NEP = 8 \times 10^{-15}$ W/Hz$^{1/2}$, on trouve $D^* \approx 5.5 \times 10^{12}$ cm.Hz$^{1/2}$/W, CQFD.

Exercice 9: Filtre

1. Cette source est plutôt orange sans filtre (pente du spectre montante quand λ augmente) et rouge avec le filtre.

2. La couleur Le filtre est carré, ce qui permet de calculer la puissance totale reçue de la source: pour $\lambda = 0.65\ \mu$m, $P_\lambda = 3.5 \times 10^{-8}$ W/μm^{-1}. La puissnace sélectionnée par le filtre (transmission 80% est donc $P = 3.5 \times 10^{-8} \times 0.80 \times 0.05 = 1.4 \times 10^{-9}$ W.

3. La réponse en Volts sera alors: $R_v = 1.4 \times 10^{-9} \times 5 \times 10^5 = 700\ \mu$V, donnat un signal sur bruit: $S/N = 117$.

4. Le NEP du détecteur vaut $\sigma/R = 1.2 \times 10^{-10}$ W.

5. La fréquence de coupure du détecteur vaut $f_c = 1/2\pi\tau = 15.9$ Hz. Lorsqu'on module le détecteur à $f = 1000/60 = 16.7$ Hz, la réponse est diminuée d'un facteur $1/\sqrt{1 + (f/f_c)^2} = 0.69$, et passe à 3.4×10^4 V/W.