

Activités de la séquence n°6

Produire des ondes électromagnétiques



Fiches de synthèse mobilisées :

- Fiche n°3 : ondes progressives périodiques
- Fiche n°6.a : rayonnement et température
- Fiche n°6.b : grandeurs énergétiques et photométriques



Sommaire des activités

ACTIVITÉ 1 :	une estimation expérimentale de la constante de Planck.....	1
ACTIVITÉ 2 :	rayonnement et température.....	4
ACTIVITÉ 3 :	quelle source brille le plus ? Introduction des grandeurs photométriques.....	6
ACTIVITÉ 4 :	pourquoi on a interdit les lampes à incandescence	7
ACTIVITÉ 5 :	mesure de la puissance d'un faisceau laser.....	8

ACTIVITÉ 1 : une estimation expérimentale de la constante de Planck

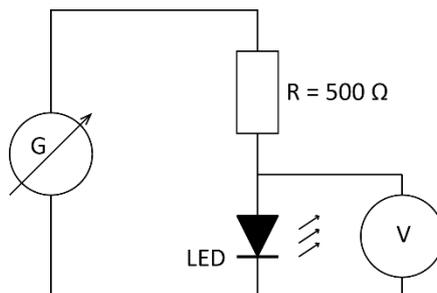
La relation de Planck-Einstein relie la fréquence d'une onde électromagnétique à l'énergie transportée par chaque photon qui la constitue. Elle s'énonce :

$$E_{\text{photon}} = h \times f$$

h est la constante de Planck. Cette activité a pour objectif de « mesurer » cette constante en utilisant des objets du quotidien : des diodes électroluminescentes (LED).

1^{ère} expérience : comportement d'une LED

- Réaliser le dispositif suivant avec une LED émettant une lumière bleue et en réglant le générateur afin qu'il impose une tension de 1V aux bornes de la LED :



- Augmenter très lentement la tension électrique et observer le comportement de la LED.

Exploitation :

- Décrire précisément la manière dont évolue la LED lorsque l'on augmente la tension électrique à ses bornes.

On rappelle que, soumis à une tension électrique de valeur U , un électron possède une énergie potentielle électrostatique de valeur :

$$E_{\text{pel}} = eU \quad (e \text{ étant la charge élémentaire})$$

- Lire les documents 1 et 2 (page 3). Exploiter les informations qu'ils contiennent pour expliquer l'existence d'une tension « seuil » en-deçà de laquelle la LED ne brille pas.



3. Exploiter les documents et les observations précédentes pour proposer une méthode permettant de mesurer l'énergie E_{photon} d'un photon émis par la LED.
4. On dispose de quatre LED émettant des lumières rouge, jaune, verte et bleue. Les longueurs d'onde des rayonnements qu'elles émettent sont connues. Proposer le protocole d'une expérience permettant de les utiliser pour déterminer **graphiquement** la valeur de la constante de Planck.
Faire valider le protocole par l'enseignante ou l'enseignant.

2^{de} expérience : « mesure » de h

- Ouvrir le fichier « Planck.xlsx » (téléchargeable sur le site des collections numériques) : c'est une feuille de calcul qui va automatiser le tracé du graphique, le calcul de sa pente et l'estimation de son incertitude.
- Programmer le tableur pour réaliser le calcul des fréquences dans les cellules C3 à C6.
- Faire les mesures nécessaires afin de compléter les cellules D3 à D6.
- Programmer le tableur pour réaliser le calcul des énergies dans les cellules E3 à E6.
- Estimer l'incertitude-type de la mesure d'une tension de seuil et saisir le résultat dans la cellule D8.

Méthode pour estimer l'incertitude-type de U_{seuil} :

- mesurer l'écart ΔU entre la dernière valeur de tension pour laquelle la LED est éteinte et la première valeur de tension pour laquelle on est certain de voir de la lumière ;
- l'incertitude-type de U_{seuil} peut alors être estimée par la relation :

$$u(U_{\text{seuil}}) = \frac{\Delta U}{2\sqrt{3}}$$

Exploitation :

5. Noter la valeur de la constante de Planck estimée à l'aide des mesures, ainsi que son incertitude-type, avec un nombre de chiffres significatifs cohérent (on gardera 2 CS pour l'incertitude-type).
6. En toute rigueur, vouloir « mesurer h » n'a plus de sens depuis mai 2019, date de la dernière réforme du système international d'unités. La valeur de h participe désormais à la définition du kilogramme et a été fixée à la valeur exacte :

$$h = 6,62607015 \times 10^{-34} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \quad (\text{unité égale au J} \cdot \text{s})$$

Ce que nous mesurons n'est donc pas la constante de Planck mais la capacité de notre expérience à obtenir sa valeur.

On estime que notre expérience nous a conduits à une valeur mesurée compatible avec la valeur de référence si :

$$|h_{\text{mesuré}} - h_{\text{réf}}| \leq 2 \times u(h_{\text{mesuré}})$$

Exploiter ce critère pour conclure sur la valeur expérimentale obtenue.



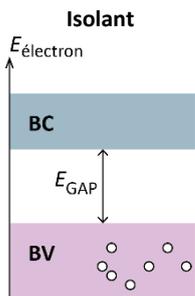
DOCUMENTS utiles à l'activité 1

DOCUMENT 1 : à propos des semi-conducteurs

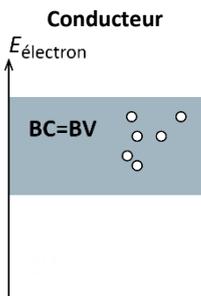
On a vu en classe de première que les atomes d'un gaz monoatomique possédaient des niveaux d'énergie : il s'agit des valeurs que peuvent prendre les électrons au sein de ces atomes. Mais lorsque les atomes sont assez proches les uns des autres pour interagir entre eux, ces niveaux d'énergie se démultiplient, si bien que dans un solide ou un liquide il ne s'agit pas de niveaux d'énergie mais de **bandes d'énergie**.

La dernière bande occupée par des électrons est appelée bande de valence (« BV » sur les schémas ci-dessous). Certaines bandes d'énergie plus élevée permettent aux électrons de circuler librement d'un atome à l'autre : ce sont les bandes de conduction (notées « BC »). Les électrons appartenant aux bandes de conduction sont dits « libres », ce sont eux qui peuvent assurer le transport du courant électrique.

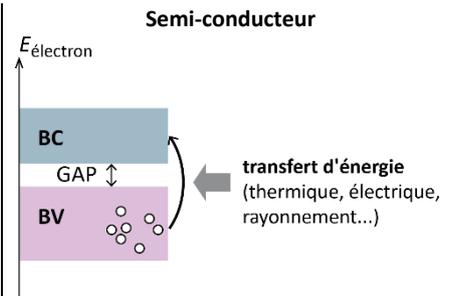
Trois cas peuvent alors se présenter :



L'énergie qui sépare bande de valence de la première bande de conduction (GAP en anglais) est trop élevée pour être franchie. Alors aucun électron ne sera jamais « libre » : le matériau est **isolant**.



Une bande de conduction est occupée même lorsque les atomes du matériau sont à l'état fondamental. Il y a donc toujours des électrons libres : le matériau est **conducteur**.

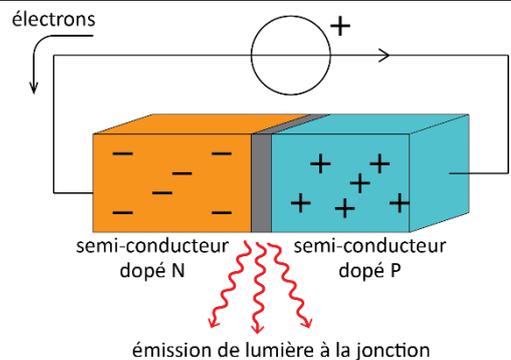


La 1^{ère} bande de conduction est inoccupée à l'état fondamental mais le GAP qui la sépare de la bande de valence est suffisamment faible pour être franchie si les atomes sont excités (c'est-à-dire si on leur apporte de l'énergie). Le matériau est **semi-conducteur**.

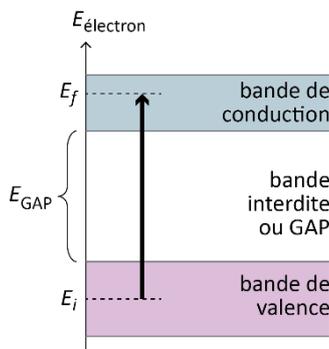
DOCUMENT 2 : l'électroluminescence

Une LED est constituée de deux matériaux semi-conducteurs juxtaposés. L'un est « dopé N », c'est-à-dire est modifié pour avoir un excès d'électrons et l'autre est dopé P, il a été modifié pour posséder un déficit d'électrons.

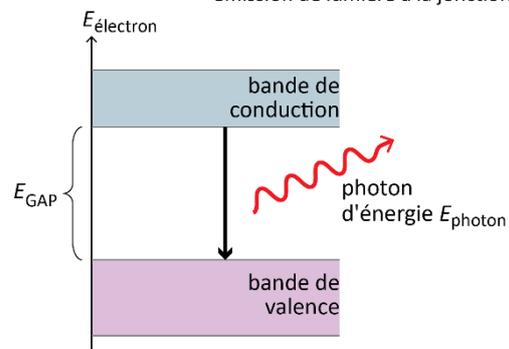
Lorsqu'un électron de la zone « N » reçoit une énergie suffisante pour atteindre la bande de conduction, il peut circuler librement, rejoindre la zone « P » et retourner à son état fondamental en émettant un photon : c'est le phénomène d'électroluminescence.



Représentation des transitions d'énergie d'un électron :



passage d'un électron de la zone N dans la bande de conduction



désexcitation de l'électron lorsqu'il atteint la zone P

ACTIVITÉ 2 : rayonnement et température

1^{ère} partie : quelle est l'étoile la plus chaude dans l'amas ouvert M103 ? Réponse intuitive.

- Observer ci-dessous (ou sur le site des collections numériques) la photographie de l'amas M103 : c'est un groupe d'étoiles observable dans la constellation de Cassiopée. Intuitivement, quelle est l'étoile appartenant à cet amas, dont la température est la plus élevée ?

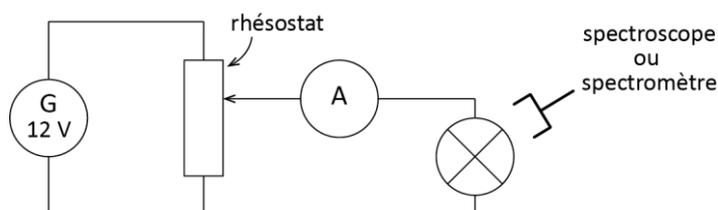


l'amas ouvert M103 – Crédit photo : Jim Mazur – Licence CC BY-SA 4.0

2^{ème} partie : lien entre température et rayonnement émis, approche expérimentale

Le but de cette partie est d'étudier l'influence de la température d'un solide (ici le filament d'une lampe à incandescence) sur le rayonnement qu'il émet.

Réaliser le montage suivant :



Le rhéostat permet de modifier l'intensité du courant qui traverse la lampe : plus celle-ci est élevée, plus la température du filament est élevée. La lumière émise par la lampe est observée à travers un spectroscopie ou analyse à l'aide d'un spectromètre à fibre.

- Observer le spectre de la lumière émise par la lampe pour différentes températures de son filament et en déduire qualitativement comment ce spectre évolue lorsque la température augmente.
- En admettant que ce que l'on observe pour le filament d'une lampe est généralisable à une étoile : répondre à nouveau à la question 1 : quelle est l'étoile la plus chaude dans l'amas M103 ?

3^{ème} partie : exploitation des lois de Wien et de Stefan-Boltzmann

DOCUMENT : loi de Wien et loi de Stefan-Boltzmann

Tout corps porté à une certaine température émet un rayonnement électromagnétique. On appelle « maximum d'émission » le rayonnement majoritairement émis, sa longueur d'onde est notée λ_{max} . Le « corps noir » est un modèle pour décrire un objet qui absorbe et réémet en totalité le rayonnement qu'il reçoit.

- La loi de Wien permet de relier la longueur d'onde du maximum d'émission du corps noir à sa température de surface T (exprimée en kelvin). Elle s'énonce :

$$\lambda_{max} = \frac{2,899 \times 10^{-3}}{T}$$

- La loi de Stefan-Boltzmann relie la puissance \mathcal{P} émise par le corps noir, sa surface extérieure S et sa température T :

$$\mathcal{P} = S\sigma T^4$$

$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ étant la constante de Stefan-Boltzmann.



10. Montrer qualitativement que les lois de Wien et de Stefan-Boltzmann sont en accord avec les constats de la question 2.
11. La température de surface du corps humain vaut 33°C en moyenne. En assimilant le corps humain au corps noir, exploiter la loi de Wien pour calculer la longueur d'onde correspondant au maximum d'émission par le corps humain.
12. À quel domaine d'ondes électromagnétiques appartient le rayonnement émis par le corps humain ? En déduire le type de caméra ayant permis de produire l'image ci-dessous.



*Une caméra de surveillance nocturne permet a permis de filmer une intrusion
Crédit photo : Thierry Ehrmann – [Licence CC BY 2.0](https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/)*



ACTIVITÉ 3 : quelle source brille le plus ? Introduction des grandeurs photométriques

DOCUMENT 1 : flux et puissance énergétiques

Le flux énergétique est la puissance reçue par une surface atteinte par un rayonnement. C'est une fraction de la puissance rayonnée par la source. Le flux énergétique est noté ϕ_{en} et exprimé en watt (W). L'éclairement énergétique d'une surface est le flux énergétique qu'elle reçoit par unité d'aire :

$$E_{\text{en}} = \frac{\phi_{\text{en}}}{S}$$

La surface S est exprimée en m^2 donc l'éclairement énergétique en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Expérience 1 :

Le professeur allume deux sources de lumière et les oriente en direction du tableau blanc :

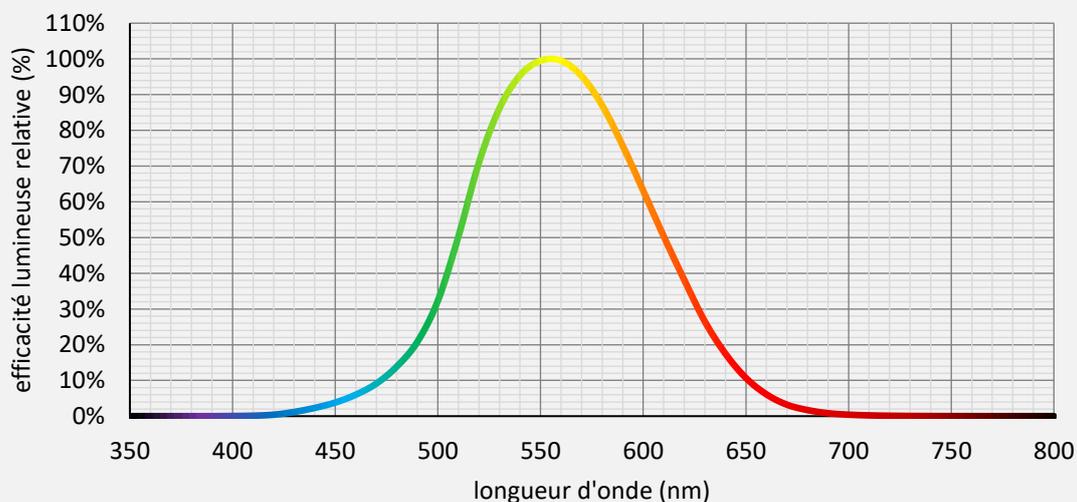
- **source 1** : une lampe rouge consommant une puissance électrique $\mathcal{P}_1 \approx 40 \text{ W}$ et de rendement $\eta_1 \approx 5\%$;
 - **source 2** : un laser rouge émettant un flux énergétique de valeur $\phi_{\text{en}2} = 1 \text{ mW}$.
1. Exploiter vos observations pour indiquer laquelle de ces deux sources produit la tache de lumière la plus brillante.
 2. Calculer le flux énergétique $\phi_{\text{en}1}$ reçu par le tableau blanc de la part de la lampe n°1 et le comparer à $\phi_{\text{en}2}$.
 3. Pourquoi la comparaison de $\phi_{\text{en}1}$ et $\phi_{\text{en}2}$ ne contredit-elle pas la réponse à la question 1 ? Exploiter la définition de l'éclairement énergétique pour répondre. Une étude quantitative est attendue, les mesures et calculs réalisés seront soigneusement détaillés.

Expérience 2 :

Le professeur allume deux lasers et les oriente en direction du mur : un laser rouge et un laser vert.

4. Lequel de ces deux lasers produit la tache de lumière la plus brillante ?
5. Consulter, dans leurs notices, la puissance des faisceaux émis par ces deux lasers et mesurer les diamètres des taches rouge et verte qu'ils produisent. Noter les valeurs obtenues. Permettent-elles d'interpréter le constat de la question 4 ?
6. Le document 2 montre l'évolution de l'efficacité lumineuse relative de l'œil en fonction de la longueur d'onde. Montrer que cette courbe permet d'interpréter le constat de la question 4.
13. Quelles devraient être la couleur et la longueur d'onde du laser produisant la tache lumineuse la plus brillante possible, pour une même puissance que les deux lasers utilisés dans cette activité ?

DOCUMENT 2 : efficacité lumineuse relative de l'œil en vision diurne



ACTIVITÉ 4 : pourquoi on a interdit les lampes à incandescence

Inventée en 1835 et rendue utilisable et commercialisable par Thomas EDISON en 1860, la lampe à incandescence a été le principal moyen d'éclairage domestique pendant plus d'un siècle. Cependant, à la fin de années 1990 elle a commencé à être délaissée par le public, jusqu'à son interdiction à la vente par l'Union Européenne à partir de 2012.

Cette activité propose de comprendre pourquoi cette interdiction, à partir de mesures d'éclairages lumineux.



lampe à incandescence

Crédit photo : Haiderr – Licence CC BY SA 4.0



lampe fluocompacte

Crédit photo : domaine public



lampe à LED

Crédit photo : domaine public

Questions préliminaires

1. On dispose de trois lampes. Chacune portés sur son culot (ou sur sa partie vitrée) une indication de puissance exprimée en watt (W). Relever cette indication pour chaque lampe et préciser de quelle puissance il s'agit à votre avis. On formulera une phrase sur le modèle : « il s'agit de la puissance [cédée ou reçue] sous forme ... par ... »

DÉFINITION : l'efficacité lumineuse

On caractérise une source de lumière par son efficacité lumineuse, grandeur définie par :

$$\eta_{\text{lum}} = \frac{\phi_{\text{lum}}}{\mathcal{P}_{\text{elec}}}$$

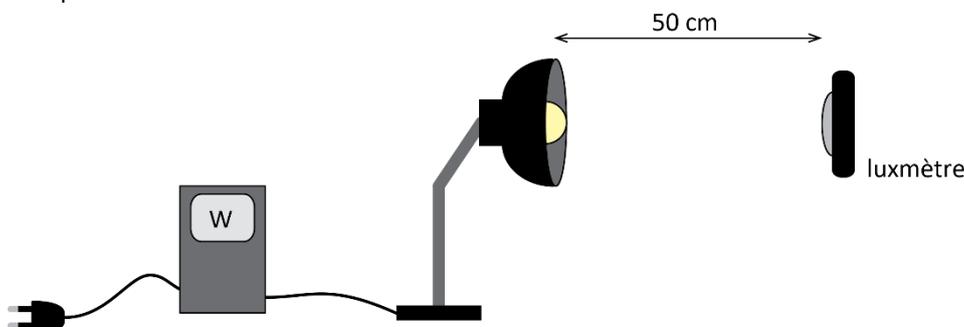
- ϕ_{lum} est le flux lumineux rayonné par la lampe, exprimé en lumen ;
- $\mathcal{P}_{\text{elec}}$ est la puissance électrique consommée par la lampe, exprimé en watt (W) ;
- η_{lum} est l'efficacité lumineuse de la lampe, exprimée en $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$.

2. Pour une qualité d'éclairage donné, quel est l'intérêt de disposer d'une lampe ayant l'efficacité lumineuse la plus élevée possible ? Exploiter la définition donnée ci-dessus pour répondre.

Mesure du rendement lumineux des trois lampes

Travail expérimental

- Se munir d'une lampe de bureau, dévisser l'ampoule et la remplacer par la lampe à incandescence.
- Brancher un compteur de puissance sur le secteur et brancher la lampe sur ce compteur.
- Mettre la lampe sous tension, attendre quelques secondes, relever la valeur de puissance donnée sur le compteur et noter la valeur lue dans la première colonne du tableau ci-dessous.
- À 50 cm de la lampe et à la même hauteur, placer un luxmètre fixé à un système assurant que celui-ci ne bougera pas pendant l'expérience.



- Toute autre source de lumière étant éliminée, mesurer l'éclairement lumineux indiqué par le luxmètre et noter la valeur obtenue dans le tableau récapitulatif ci-dessous.
- Sans déplacer la lampe de bureau, dévisser la lampe et la remplacer par la lampe fluocompacte.



- Effectuer les mêmes mesures permettant de compléter la deuxième colonne du tableau. Attention, avec une lampe fluocompacte il faut attendre quelques minutes pour que son éclat atteigne sa valeur maximale.
- Recommencer avec la lampe à LED.

Tableau récapitulatif des résultats :

Source	$\mathcal{P}_{\text{elec}}$ (W)	E_{lum} (lux)	ϕ_{lum} (lm)	η_{lum} (lm·W ⁻¹)
Lampe à incandescence				
Lampe fluocompacte				
Lampe à LED				

Exploitation des mesures

3. Exploiter les mesures pour valider ou invalider la réponse à la question 1 : quelle est la puissance mentionnée sur les lampes ?
4. En admettant que la lampe émette dans un demi-espace, son rayonnement est réparti sur une demi-sphère dont le rayon est égal à la distance lampe – luxmètre. Calculer la surface S sur laquelle le flux lumineux émis par chacune des sources étudiées est réparti.
Donnée : aire d’une sphère de rayon R : $S = 4\pi R^2$
5. En déduire la valeur des flux lumineux rayonnés par chacune des trois sources étudiées et compléter le tableau.
6. Finalement, calculer le rendement lumineux de chaque lampe.
7. Conclure en expliquant la raison de l’interdiction des lampes à incandescence.

ACTIVITÉ 5 : mesure de la puissance d’un faisceau laser

L’objectif de cette activité est de mesurer la puissance émise par un laser en utilisant un luxmètre.

DOCUMENT 1 : efficacité lumineuse relative de l’œil
 Voir document annexe téléchargeable sur le site des collections numériques.

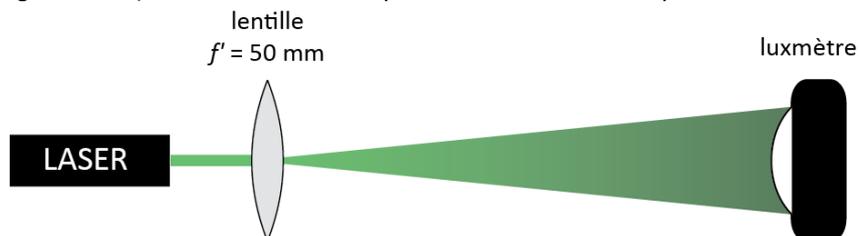
DOCUMENT 2 : estimation de l’incertitude-type
 L’incertitude-type de la puissance rayonnée \mathcal{P} calculée à partir d’une mesure effectuée au luxmètre s’estime par la relation :

$$u(\mathcal{P}) = \mathcal{P} \sqrt{4 \left(\frac{u(d)}{d} \right)^2 + \left(\frac{u(V(\lambda))}{V(\lambda)} \right)^2}$$

- d étant le diamètre du capteur du luxmètre et $u(d)$ étant estimé à une graduation de l’instrument utilisé pour le mesurer ;
- $V(\lambda)$ étant l’efficacité lumineuse relative de l’œil à la longueur d’onde considérée et $u(V(\lambda))$ étant estimée à une demi-graduation verticale du graphique sur lequel elle est mesurée.

Expérience :

- Réaliser le montage suivant (le faisceau laser doit épouser les contours du capteur du luxmètre) :





- En l'absence de toute autre source de lumière, mesurer l'éclairement lumineux E_{lum} et noter la valeur obtenue.

Exploitation de l'expérience

1. On souhaite connaître le flux lumineux reçu par le luxmètre : cela nécessite de mesurer une deuxième grandeur : préciser laquelle, réaliser cette mesure et en déduire la valeur de ϕ_{lum} .
2. Les lasers verts émettent avec une longueur d'onde de 532 nm et les lasers rouges avec une longueur d'onde de 650 nm. Exploiter cette information et la courbe d'efficacité relative de l'œil pour déduire de la réponse précédente la valeur du flux énergétique reçu par le luxmètre.
3. Pourquoi peut-on dire que le flux énergétique calculé à la question précédente est la puissance rayonnée par le laser ?
4. Exploiter le document 2 pour estimer les incertitudes-types $u(V(\lambda))$, $u(d)$ et en déduire $u(\mathcal{P})$.
5. Le laser testé est de classe 2 : il s'agit d'une norme qui impose que la puissance émise soit inférieure à 1 mW. On estime que la norme est satisfaite si l'écart $1 \text{ mW} - \mathcal{P} \geq 2 \times u(\mathcal{P})$: cela signifie que \mathcal{P} est bien inférieure à 1 mW, avec une marge tenant compte de l'incertitude de mesure.
Exploiter ce critère pour indiquer si notre mesure nous donne l'assurance que le laser testé respecte bien la classe 2.