

Photométrie

L'optique géométrique étudie la marche des faisceaux lumineux à travers des milieux transparents. Or, 2 faisceaux lumineux, l'un provenant d'une bougie et l'autre d'un laser, ne sont pas identiques. Il est donc nécessaire d'introduire de nouvelles grandeurs pour les caractériser.

En **radiométrie**, on s'intéresse à l'énergie rayonnante émise par une source ou reçue par un détecteur sans se préoccuper de l'impression produite sur l'œil.

En **photométrie**, on s'intéresse aussi à l'énergie des radiations, mais en tenant compte de la sensibilité de l'œil qui n'est sensible qu'aux radiations de longueur d'onde comprises entre 400 nm (bleu) et 700 nm (rouge). On mesure l'apparence de la lumière visible pour un observateur ayant une vision normale.

I - Grandeurs énergétiques

1) Flux énergétique

Le flux énergétique P est la puissance émise, transportée ou reçue sous forme de rayonnement.

Unité : le Watt (W)

Exemple : le flux émis par le Soleil est : $P = 3,92 \cdot 10^{26}$ W

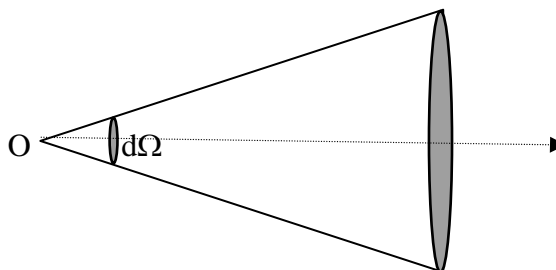
2) Intensité énergétique

Soit une source ponctuelle O . On appelle intensité énergétique de cette source dans une direction donnée :

Soit $d\Omega$ l'angle solide, de sommet O , autour de la direction considérée.

$$I = dP/d\Omega$$

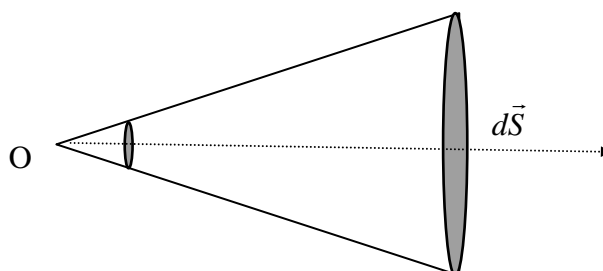
Unité : Watt par stéradian : $W \cdot sr^{-1}$



3) Eclairement énergétique

Cette grandeur concerne le récepteur exposé à la lumière.

Soit dS un petit élément de surface du récepteur recevant un flux énergétique dP . On appelle éclairement énergétique la quantité :



$$E = dP/dS$$

Unité : $W \cdot m^{-2}$

Le Soleil envoie un flux énergétique de $1,8 \cdot 10^{17}$ W environ sur la Terre. Par temps clair, en été, l'éclairement énergétique est : $E = 1 \text{ kW.m}^{-2}$ environ au niveau du sol.

L'éclairement énergétique se mesure à l'aide de détecteurs thermiques, tel le **bolomètre** : il absorbe toutes les radiations incidentes sur un élément noir non réfléchissant, ce qui augmente sa température. Dans un bolomètre, l'élément est une bande de platine noircie : la résistance électrique de cette bande varie en fonction de la température. La mesure de la résistance permet de déterminer l'élévation de température et si on connaît la capacité thermique de la bande de platine, on détermine l'énergie totale absorbée. La réponse est indépendante de la longueur d'onde de la radiation incidente.

4) Remarque

Ces grandeurs peuvent être soit rapportées à une unique radiation de fréquence ν , c'est à dire à un rayonnement monochromatique, soit intégrées pour l'ensemble des radiations présentes dans le spectre du rayonnement.

Si le rayonnement est *monochromatique* et si n désigne le nombre de photons traversant une surface S par unité de temps, le flux énergétique correspond à la puissance : $P = n h \nu$

Si le rayonnement est *polychromatique* et si n_ν désigne le nombre de photons d'énergie $h\nu$ traversant une surface S par unité de temps, le flux énergétique correspond à la puissance :

$$P = \int n_\nu h \nu d\nu$$

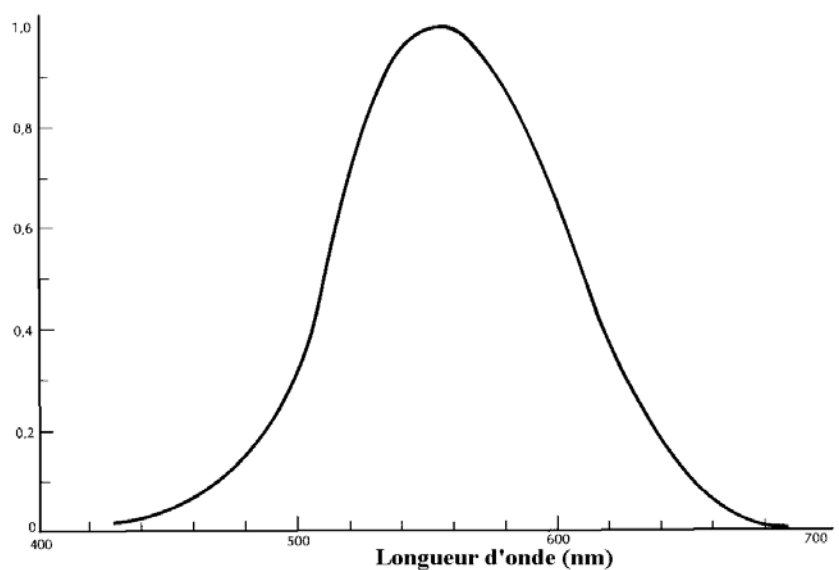
II - Grandeurs photométriques

Le flux énergétique caractérise physiquement un rayonnement lumineux mais n'apporte aucune indication sur la façon dont celui-ci est perçu par l'œil.

En effet, la sensibilité de l'œil dépend de la longueur d'onde. Totalement insensible aux infrarouges et aux ultraviolets, l'œil est plus sensible au bleu qu'au rouge et sa sensibilité est maximale pour une longueur d'onde voisine de 555 nm en **vision diurne** (ou photopique), mettant en cause les 3 millions de cônes de la rétine sensibles sélectivement au jaune (575 nm), au vert (535 nm) et au bleu (440 nm).

Aux faibles éclaircissements (**vision nocturne** ou **scotopique** assurée par un milliard de bâtonnets), le maximum de la courbe est décalée vers le bleu (510 nm).

L'efficacité lumineuse relative spectrale de l'œil-type, $V(\lambda)$, représente la "sensibilité" de l'œil humain moyen en fonction de la longueur d'onde.



Efficacité spectrale relative pour un observateur normal

$\lambda(\text{nm})$	400	450	500	555	600	650	700
$V(\lambda)$	$4 \cdot 10^{-4}$	$3,8 \cdot 10^{-2}$	0,323	1	0,631	0,107	$4,1 \cdot 10^{-2}$

1) Intensité lumineuse

C'est la quatrième grandeur fondamentale de l'Optique. L'unité, la **Candela** (Cd), permet de rattacher les phénomènes propres à la *photométrie* à la puissance énergétique exprimée en Watt. On l'appelle ainsi car, à l'origine, la référence d'intensité lumineuse était la bougie (candle en anglais).

"La Candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence $\nu = 540 \cdot 10^{12}$ Hz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est 1/683 Watt par stéradian."

(16^{ème} Conférence Générale des Poids et Mesures - 1979)

1 Candela (Cd) = (1/683) Watt.sr⁻¹ à la fréquence $\nu = 540 \cdot 10^{12}$ Hz, c'est-à-dire à : $\lambda = 550$ nm

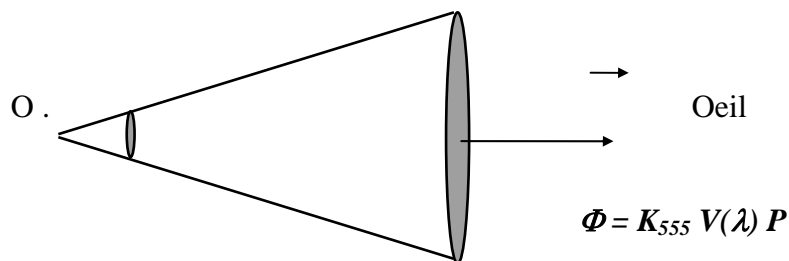
L'intensité lumineuse d'une source quelconque est alors rapportée à celle de la source monochromatique étalon de fréquence $540 \cdot 10^{12}$ Hz. Cette radiation correspond à une longueur d'onde dans le vide voisine de $\lambda = 555$ nm. D'aspect jaune-vert, cette radiation est située au maximum de sensibilité de l'œil.

2) Flux lumineux

Un faisceau lumineux qui pénètre dans l'œil produit une sensation lumineuse que l'on caractérise par le flux lumineux Φ .

Unité : le **lumen** (lm) est un flux émis dans un angle solide de 1 stéradian par une source ponctuelle ayant une intensité uniforme de 1 candela.

a) Flux lumineux monochromatique



Φ : flux lumineux (lm) qui caractérise l'impression produite sur la rétine d'un observateur.

P : flux énergétique (W)

K_{555} : facteur qui relie les grandeurs énergétiques aux grandeurs photométriques :

$K_{555} = 673 \text{ lm.W}^{-1}$.

A 555 nm, 1 watt vaut 673 lumen ; mais à 600 nm, 1 watt vaut 430 lumen.

Pour une longueur d'onde λ donnée, le flux lumineux est proportionnel au flux énergétique mais dépend de la "sensibilité" de l'œil caractérisée par $V(\lambda)$, ce qui fait que 2 faisceaux lumineux de même flux énergétique seront perçus différemment par l'œil si leurs longueurs d'onde sont différentes. L'impression ressentie paraît maximale pour les teintes vert-jaune. Le maximum se déplace selon l'intensité lumineuse vers les bleus lorsque l'intensité décroît mais s'approche des rouges quand elle augmente.

C'est ainsi que le soir, toutes les couleurs bleuissent tandis que sous une lumière éclatante d'été, les rouges deviennent agressifs.

L'œil arrive à percevoir un flux lumineux minimum de 10^{-13} lm, c'est à dire à un nombre de photons de longueur d'onde $\lambda = 555$ nm égal à $n = 4^{10}$ photons par seconde.

b) Faisceau lumineux polychromatique

On admet que les rayonnements agissent d'une façon linéaire et additive quelque soit la composition spectrale du faisceau.

$$\Phi = \int K_{555} V(\lambda) P_{\lambda} d\lambda$$

Pour un faisceau lumineux de composition spectrale fixée, flux énergétique et flux lumineux sont des grandeurs proportionnelles : on appelle **efficacité lumineuse** le rapport du flux lumineux au flux énergétique :

$$\nu = \frac{\text{Flux lumineux } \Phi (\text{lumen})}{\text{Flux énergétique } P (\text{Watt})}$$

Sur les lampes d'éclairage, le constructeur indique toujours la puissance consommée (en Watt) et parfois le flux lumineux Φ (en lumen) émis dans tout l'espace (4π stéradians).

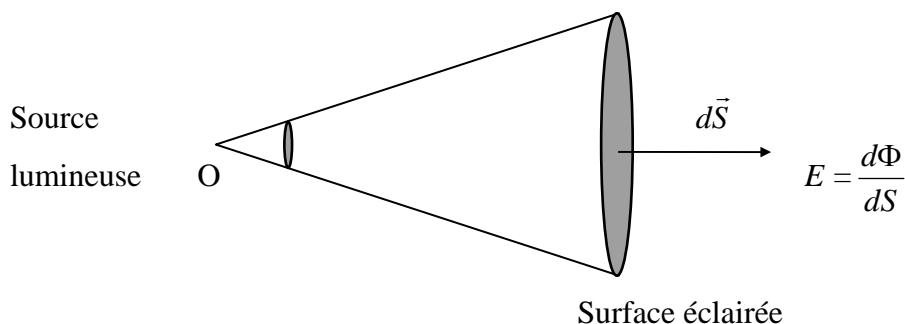
L'**efficacité lumineuse** ν d'une lampe est le rapport entre le flux lumineux exprimé en lumen et la puissance électrique exprimée en Watt.

Exemple : pour une **lampe à filament de tungstène**, 16 % de l'énergie est dissipée par convection dans les gaz, 2 % est dissipée par conduction (suspension et électrodes d'amenée du courant) ; il y a donc 86 % de l'énergie rayonnée. 7,5 % seulement de l'énergie d'une ampoule à incandescence est émise dans la région du spectre visible (contre 20 % pour une lampe fluorescente). Une grande partie de l'infrarouge est absorbée dans le verre de l'ampoule, de sorte que l'on a en fait une efficacité lumineuse : $\nu \sim 15 \text{ à } 20 \text{ lm.W}^{-1}$ pour une lampe à filament de tungstène de 100 W, soit un **rendement de l'ordre de 2,5 %**.

L'efficacité d'un tube fluorescent est : $\nu \sim 40 \text{ lm.W}^{-1}$ et celle du Soleil : $\nu \sim 100 \text{ lm.W}^{-1}$.

3) Eclairage lumineux (ou éclairage)

Soit une surface dS éclairée par un faisceau lumineux dont le flux lumineux est $d\Phi$.



L'éclairage, dont l'unité est le **lux** (lx), représente le flux lumineux reçu par unité de surface.

Si l'éclairage est uniforme sur une surface, le flux Φ reçu par la surface S est : $\Phi = E S$

La mesure de l'éclairage n'est pas simple, car aucun système électrique n'a la même réponse à la lumière que l'œil humain.

Le sulfure de cadmium (*SCd*), photoconducteur dont la résistance électrique augmente lorsqu'il est exposé à la lumière, est souvent utilisé en photographie pour mesurer l'éclairement ; sa réponse à la lumière est semblable à celle d'un observateur humain.

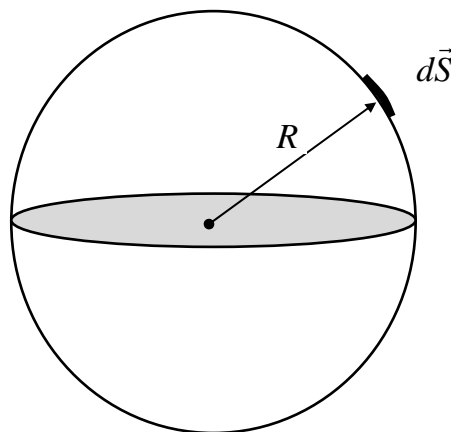
Ciel nocturne	$3 \cdot 10^{-4}$ lx
Pleine lune	0,2 lx
Plein soleil en été	100 000 lx
Table d'opération chirurgicale	10 000 lx
Salle de classe	400 lx
Pour bien lire	300 lx

Stade de France : 1600 lx

Lampes à halogénures métalliques, à arc court, pour obtenir l'intensité imposée par les normes de la télévision numérique. Les couleurs vont des teintes chaudes (orange) à l'extérieur aux teintes froides et puissantes (blanches) au centre de la pelouse où l'éclairage est très homogène pour éviter les alternances d'ombres et de lumière. L'anneau, éclairé par en dessous, renvoie sur le parvis une lumière enveloppante où aucun point lumineux ne vient voiler la vision. le regard se focalise sur le jeu.

4) Loi de l'inverse du carré des distances

Si on admet que la lampe émet un flux Φ de lumière de façon isotrope et qu'il n'y a pas d'atténuation, l'éclairement de la surface d'une sphère de rayon R sera le même, quelque soit l'endroit sur la sphère de surface : $S = 4\pi R^2$



$$E = \frac{\Phi}{S} = \frac{\Phi}{4\pi R^2}$$

L'éclairement varie en fonction inverse du carré des distances source - surface éclairée.

Exemple : Une lampe, supposée ponctuelle, placée à 3 m d'une surface, l'éclaire 9 fois moins que si cette surface se trouve à 1 m de la lampe.

Effet photoélectrique

Dualité onde-particule - Le photon

En 1905, *Einstein* (1879-1955) émit le concept que la lumière est composée de photons. Un photon se déplace à la vitesse de la lumière et son énergie est reliée à la fréquence de la lumière par la relation :

$$E = h\nu \quad h = \text{constante de Planck} = 6,6262 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$$

Définition de l'effet photoélectrique (Philipp Lenard - 1902)

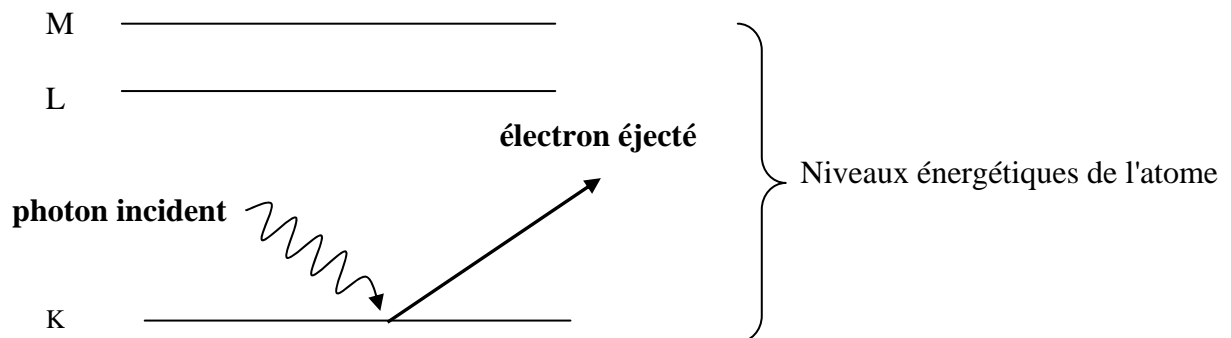
L'effet photoélectrique est l'éjection d'un électron du cortège électronique d'un atome ou de la surface d'un métal lorsqu'une radiation électromagnétique (photons) le frappe.

1) Effet photoélectrique sur un électron lié au cortège électronique

Le **photon cède toute son énergie** à un électron lié à un atome. L'électron est alors éjecté du cortège électronique.

$$E_{(\text{photon})} = E_{(\text{énergie de liaison de l'électron})} + E_{(\text{cinétique de l'électron})}$$

$$h\nu = E_{\text{liaison}} + E_c$$



L'effet photoélectrique est suivi d'une réorganisation du cortège électronique : les électrons des niveaux supérieurs viennent combler le vide laissé par l'électron éjecté. Il y a *réarrangement des couches électroniques* et donc *émission de rayons X*.

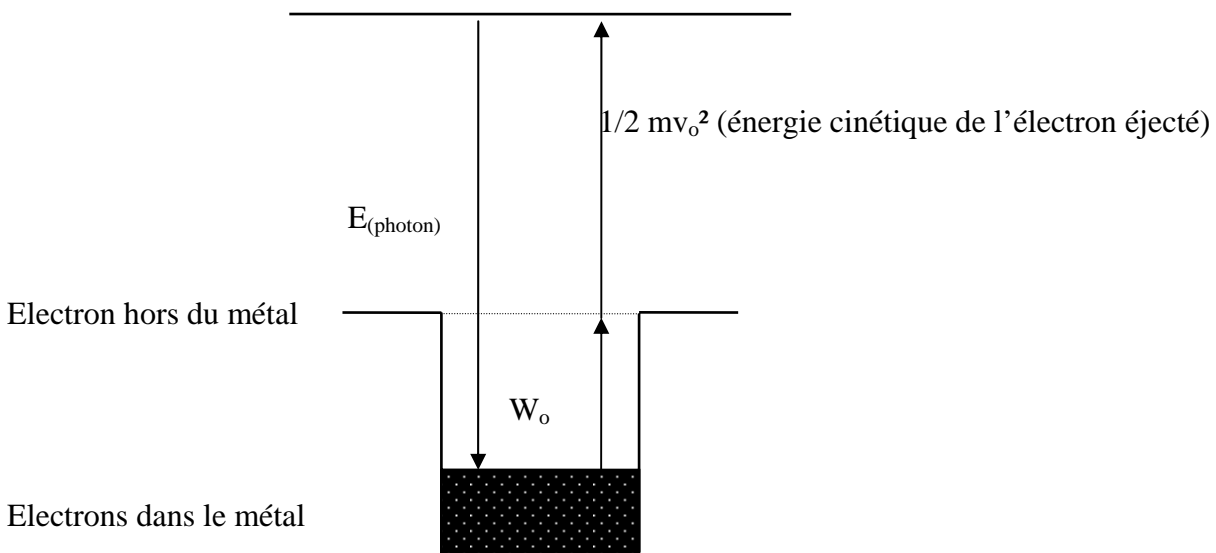
2) Extraction d'un électron d'un métal

A l'intérieur d'un métal, les forces d'attraction et de répulsion entre les électrons et les noyaux se compensent. A la surface du métal, les noyaux et les électrons des couches internes empêchent les électrons de valence de sortir.

Si l'on pouvait voir quelques couches d'atomes à la surface d'un métal, on verrait une multitude d'atomes qui exécutent des mouvements d'oscillations autour de leur position d'équilibre. Plus la température est élevée, plus les oscillations sont grandes ; il arrive même qu'à un certain moment, un électron puisse être repoussé hors du métal s'il reçoit une énergie minimale, appelée travail d'extraction W_0 .

Si l'électron ne reçoit que cette énergie W_0 , sa vitesse à la sortie du métal sera nulle.

Par contre, s'il reçoit une énergie $E > W_0$, il a une énergie cinétique E_c égale à la différence entre l'énergie reçue W et le travail d'extraction W_0 .



L'énergie E peut être d'origine thermique (élévation de température du métal : effet thermo-électronique utilisé pour produire des faisceaux d'électrons dans un tube cathodique), ou provenir de l'extérieur, sous forme de radiation électromagnétique (effet photoélectrique)

L'énergie $E = h\nu$ du photon est **totalemment** cédée à un électron qui est extrait du métal. La différence d'énergie ($h\nu - W_0$) est communiquée à l'électron sous forme d'énergie cinétique.

$$E_{\text{(photon)}} = h\nu = W_0(\text{Travail d'extraction du métal}) + 1/2 mv_o^2(\text{Energie cinétique de l'électron})$$

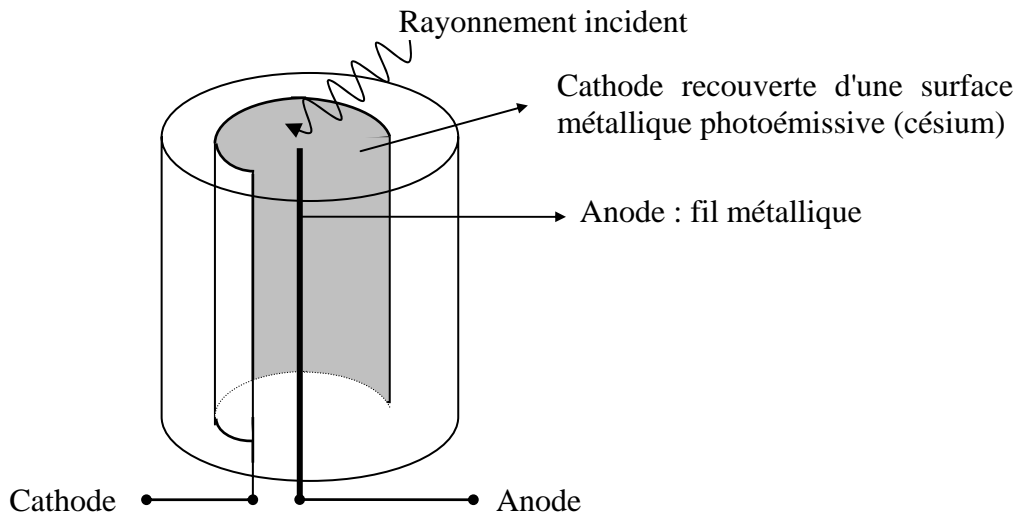
Cellule à vide

L'étude quantitative de l'effet photoélectrique se fait à l'aide d'une cellule à vide. La cathode métallique, éclairée par une radiation de fréquence ν , émet des électrons qui sont accélérés vers l'anode sous une différence de potentiel U .

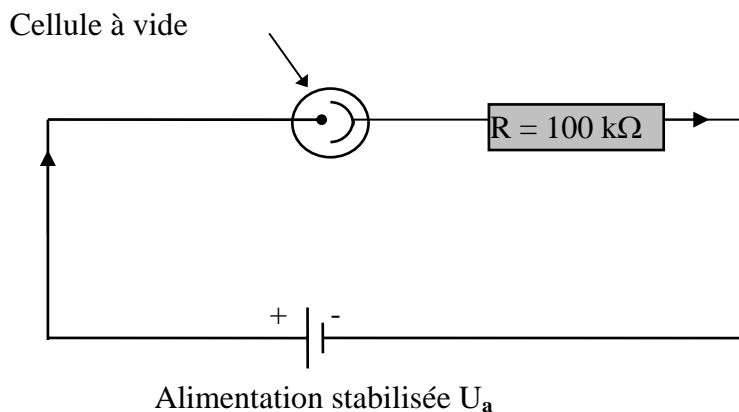
Commencer votre compte rendu en rappelant la définition de l'effet photoélectrique sur une surface métallique et la relation fondamentale de conservation de l'énergie.

1) Description de la cellule à vide AV 90

Dans une ampoule dans laquelle règne un *vide poussé* (10^{-5} Pa) se trouvent la cathode C, feuille métallique de surface : $S = 350 \text{ mm}^2$, recouverte d'une couche photoémissive au césium ($W_0 = 1,88 \text{ V}$; $\lambda_0 = 660 \text{ nm}$), et l'anode A, fil métallique qui n'intercepte qu'un minimum de rayonnement lumineux, portée à un potentiel positif.



2) Caractéristique de la cellule à vide à éclairage constant E



Recopier et compléter le schéma électrique en notant le courant I et les chutes de tension aux bornes des différents dipôles. Ecrire la loi des mailles.

Placer la cellule à vide à l'extrémité d'une boîte en bois fermée par un couvercle pour que l'éclairement de la cellule reste constant.

La cellule à vide est éclairée par une lampe à incandescence située à l'autre extrémité de la boîte. *Noter la puissance électrique P de la lampe utilisée.*

L'éclairement E est mesuré avec un *luxmètre* placé au même niveau que la cellule. Le luxmètre utilisé est une cellule à couche d'arrêt, de diamètre 6 cm. Muni d'un filtre, il donne la même réponse spectrale que l'œil humain international. Le galvanomètre donne directement en lux l'éclairement de la cellule.

$E = \text{flux lumineux reçu par la cellule} / \text{surface de la cellule}$

L'éclairement E peut être modifié en faisant varier la distance lampe-cellule.

Entre la lampe et la cellule, on place un **filtre vert**, de façon à travailler en **lumière monochromatique** ($\lambda \sim 550 \text{ nm}$).

a) Mesures

Placer la lampe à 50 cm environ de la cellule. *Noter l'éclairement E de la cellule.*

La tension U aux bornes de la cellule et le courant I circulant dans le circuit seront mesurés avec un seul voltmètre électronique.

Faire varier la tension U_a aux bornes de l'alimentation de 0 à 25 V et remplir le tableau :

U_a (V)	0	0,5	1	1,5	2	3	4
U (V)							
U_r (V)							
I (μA)							

U_a (V)	6	8	10	14	18	22	25
U (V)							
U_r (V)							
I (μA)							

b) Caractéristique de la cellule à vide à éclairement constant E : $I = f(U)$

Tracer la caractéristique : $I = f(U)$. Relier les points expérimentaux avec un crayon à papier.

Commenter l'allure de la courbe obtenue en répondant aux questions suivantes :

- Pourquoi observe-t-on un courant de saturation I_s à partir d'une certaine tension U ?
- Pourquoi le courant n'est-il pas nul si $U = 0$?
- Que faudrait-il faire pour annuler ce courant ?

3) Réponse de la cellule à vide

La façon dont varie le courant I_s en fonction de l'éclairement reçu traduit la réponse de la cellule. Si la variation est linéaire, cela signifie que le nombre d'électrons expulsés est proportionnel à l'éclairement, et donc au nombre de photons reçus par la cellule.

Le montage est le même que précédemment ; on fixe $U = 20 \text{ V}$ et on fait varier l'éclairement en éloignant ou en approchant la lampe à incandescence de la cellule à vide.

Pour différentes distances r entre la cellule et la lampe, dresser le tableau de mesures :

R (m)	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,90	1,00
E (lx)									
I_s (μA)									

a) Tracer la courbe : $I_s = f(E) = s E$

La variation est-elle bien linéaire ?

En déduire la sensibilité de la cellule : $s = \Delta I_s / \Delta E$ en $\mu\text{A} \cdot \text{lux}^{-1}$ en déterminant la pente de la droite.

b) Déterminer le rendement η de la cellule pour des radiations de couleur verte.

$$\eta = \frac{\text{nombre de photons } n \text{ provoquant l'effet photoélectrique}}{\text{nombre de photons incidents}} = \frac{I_s / e}{ES / h\nu} = \frac{I_s h c}{e E S \lambda}$$

Soit : $\eta = 673 (I_s h c) / (e E S \lambda) = 4,40 \text{ s } (\mu\text{A} \cdot \text{lux}^{-1})$ $1 \text{ W} = 673 \text{ lumens si } \lambda = 555 \text{ nm}$

Le rendement η serait-il le même pour des radiations de couleur rouge ?

4) Loi de l'inverse du carré des distances : $E = \frac{\Phi}{S} = \frac{\Phi}{4\pi R^2}$

Enoncer la loi de l'inverse du carré des distances en faisant un schéma clair.

Créer une nouvelle variable : $x = 1/R^2$

Tracer les courbes : $E = f(x) = k x$

La loi est-elle vérifiée dans cette expérience ?

En déduire le **flux lumineux** Φ émis par la lampe et son **efficacité lumineuse** : $\nu = \Phi/P$, où P est la puissance électrique de la lampe.

$$E = \Phi / (4\pi R^2) = k/R^2 = k x$$

$$k = \Phi / 4\pi$$

$$\Phi = 4\pi k$$