

Mesures et incertitudes : activité pour les élèves

Estimation expérimentale de la constante de Planck



Cette activité est adossée au programme de la partie « Ondes » de la spécialité SPCL (Sciences Physiques et Chimiques en Laboratoire) de la classe de terminale. Elle peut être proposée au début de la séquence 6 : « produire des ondes électromagnétiques ».

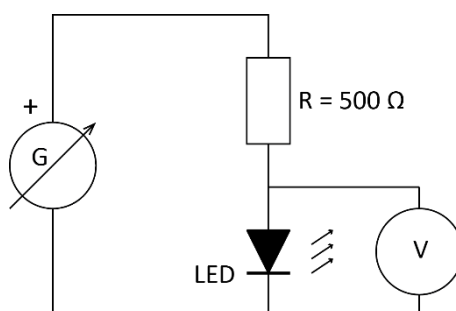
Objectif de l'activité

Cette activité propose de mettre au point et de tester une méthode expérimentale permettant d'accéder à la valeur de la constante de Planck avec un objet du quotidien : la diode électroluminescente (DEL ou LED en anglais). Nous procéderons à cette « mesure » de h et comparerons la valeur mesurée à celle aujourd'hui admise.

1. Premières observations avec une LED et interprétation

Expérience :

- 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.

Interprétation des observations

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

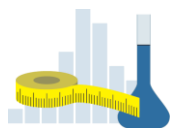
On rappelle que, soumis à une tension électrique de valeur U , un électron possède une énergie potentielle électrostatique de valeur : $E_{pel} = eU$ (e étant la charge élémentaire)

2. Lire les annexes 1 et 2 en fin d'énoncé. Exploiter les informations qu'elles contiennent pour expliquer l'existence d'une tension « seuil » en-deçà de laquelle la LED ne brille pas.
3. On note U_{seuil} la tension minimale aux bornes de la LED lui permettant de briller : on l'appelle « tension de seuil ». Exploiter les documents et les observations précédentes pour montrer que la LED émet des photons ayant une énergie de valeur $E_{photon} = eU_{seuil}$.
4. En déduire une méthode permettant de mesurer l'énergie d'un photon émis par la LED.

2. Estimation expérimentale de la constante de Planck

Réalisation des mesures

Ouvrir la feuille de calcul « MI_Planck » qui nous servira à rassembler et exploiter les résultats expérimentaux.



5. Nous allons exploiter 4 LED de couleurs rouge, jaune, verte et bleue. Leurs spectres d'émission sont donnés dans l'annexe 3. Exploiter ces spectres pour compléter la colonne B avec les valeurs de leurs longueurs d'ondes d'émission maximale.
6. Programmer la colonne C pour calculer les fréquences correspondantes.
7. Avec le dispositif de la première partie, faire les mesures nécessaires pour compléter la colonne D de la feuille de calcul avec les valeurs des tensions de seuil de chacune des quatre LED proposées.
8. Dans la colonne E, calculer l'énergie des photons émis par chacune de ces quatre LED en exploitant la relation obtenue à la question 3.

Donnée : la charge élémentaire vaut $e = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$.

Exploitation des mesures

9. Le graphique représentant E_{photon} en fonction de la fréquence f se trace automatiquement au fur et à mesure que l'on saisit les valeurs. Montrer que ce graphique semble compatible avec l'énoncé de la loi de Planck-Einstein : $E_{\text{photon}} = h \times f$.

Une méthode de détermination de h pourrait consister à modéliser les points expérimentaux comme une fonction affine ou linéaire et à en déterminer le coefficient directeur. Or la méthode dite « des moindres carrés », utilisée par les tableurs pour tracer des droites de modélisation, n'est valide que sous certaines conditions, la première étant que *la grandeur portée en abscisse doit avoir une incertitude négligeable* par rapport à celle de la grandeur portée en ordonnée.

10. En analysant les sources d'erreur affectant les valeurs de fréquences, montrer que la modélisation par une droite avec la méthode des moindres carrés n'est pas pertinente dans notre cas.
11. Nous allons donc procéder différemment : nous allons calculer les quatre valeurs de la constante de Planck h données par chacune de nos quatre mesures et en calculer la valeur moyenne. Programmer les cellules F3 à F6 pour calculer les valeurs de h correspondant à nos quatre mesures et, dans la cellule F10, calculer la valeur moyenne des constantes de Planck mesurées.

Syntaxe à utiliser pour calculer une moyenne : « = MOYENNE (plage) »

3. Étude critique de la valeur de h « mesurée »

DOCUMENT 1 : évaluation d'une incertitude-type par une méthode de type A

Si l'on dispose d'un échantillon de n valeurs d'une même grandeur physique x , alors :

- le meilleur estimateur de la valeur de x est la moyenne des valeurs de l'échantillon ;
- son incertitude-type peut être évaluée à partir de l'écart-type s de l'échantillon par la relation :

$$u(x) = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

DOCUMENT 2 : comparaison d'un résultat de mesure à une valeur de référence

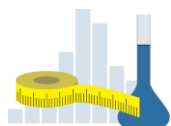
Une valeur de référence x_{ref} d'une grandeur x est une valeur supposée avoir une incertitude beaucoup plus faible que la valeur mesurée x_{mes} à laquelle on la compare.

On considère que la valeur mesurée est compatible avec la valeur de référence si leur différence (en valeur absolue) est inférieure au double de l'incertitude-type, soit :

$$|x_{\text{mes}} - x_{\text{ref}}| \leq 2 \times u(x_{\text{mes}})$$

Ce que nous venons de faire n'est pas exactement une mesure de la constante de Planck. En effet, depuis 2019, « mesurer h » n'a plus de sens puisque sa valeur a été définitivement fixée et intervient dans la nouvelle définition du kilogramme : h est une **constante fondamentale**. Elle vaut :

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



Ce que nous mesurons en réalité est donc l'aptitude de notre protocole à obtenir une valeur de h compatible avec celle donnée ci-dessus, considérée comme une référence.

12. Programme les cellules F11 et F12 pour calculer l'écart-type de l'échantillon de valeurs de h puis l'incertitude de la moyenne de cet échantillon.

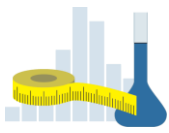
Syntaxe à utiliser pour calculer un écart-type :

- sous LibreOffice : « = ECARTYPE.S(*plage*) »
- sous Excel (version avant 2014) : « = ECARTYPE(*plage*) »
- sous Excel (version récentes) : « = ECARTYPE.STANDARD(*plage*) »

13. Donner quelques sources d'erreur pouvant expliquer l'incertitude-type obtenue.

14. Appliquer le critère présenté dans le document 2 pour évaluer la compatibilité (ou non) de la moyenne des valeurs mesurées avec la valeur de référence de la constante de Planck.

15. Lister quelques sources d'erreur expliquant l'écart entre la valeur de référence et la valeur mesurée de la constante de Planck.

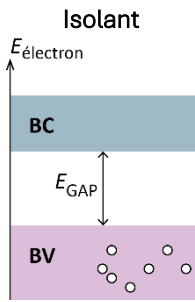


ANNEXE 1 : à propos des semi-conducteurs

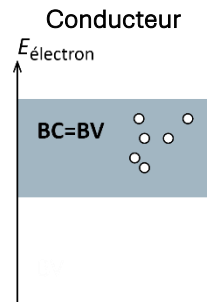
On a vu en classe de première que les atomes d'un gaz monoatomique possédaient des niveaux d'énergie : il s'agit des valeurs que peuvent prendre les électrons au sein de ces atomes. Mais lorsque les atomes sont assez proches les uns des autres pour interagir entre eux, ces niveaux d'énergie se démultiplient,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

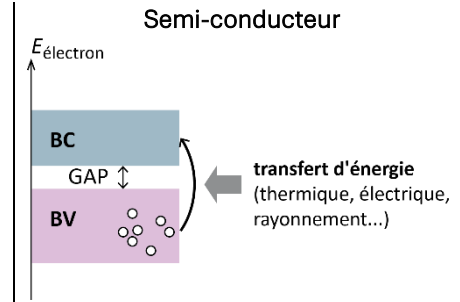
Trois cas peuvent alors se présenter :



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**.

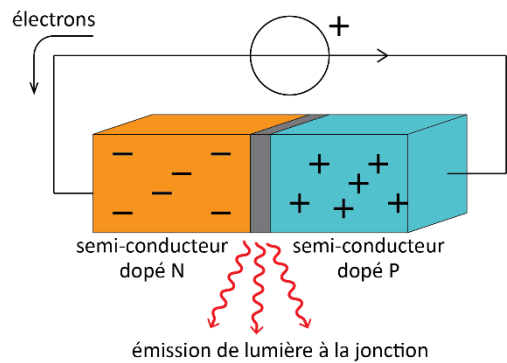


La 1^{ère} bande de conduction est inoccupée à l'état fondamental mais le GAP qui la sépare de la bande de valence est suffisamment faible pour être franchie si les atomes sont excités (c'est-à-dire si on leur apporte de l'énergie). Le matériau est **semi-conducteur**.

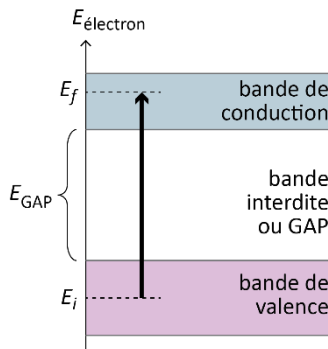
ANNEXE 2 : l'électroluminescence

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.

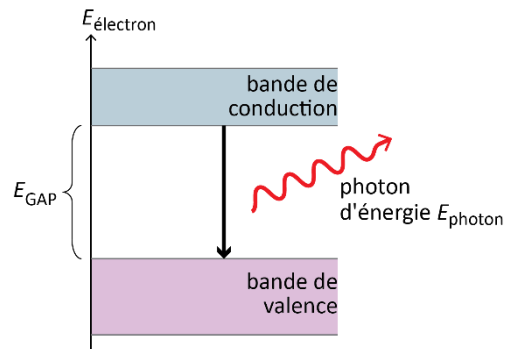
Lorsqu'un électron de la zone « N » reçoit une énergie suffisante pour atteindre la bande de conduction, il peut circuler librement, rejoindre la zone « P » et retourner à son état fondamental en émettant un photon : c'est le phénomène d'électroluminescence.



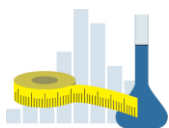
Représentation des transitions d'énergie d'un électron :



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

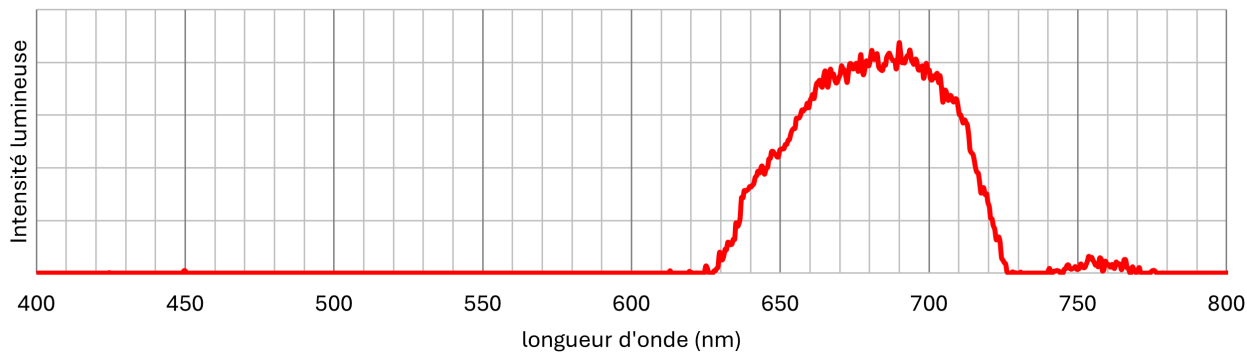


désexcitation de l'électron lorsqu'il atteint la zone P

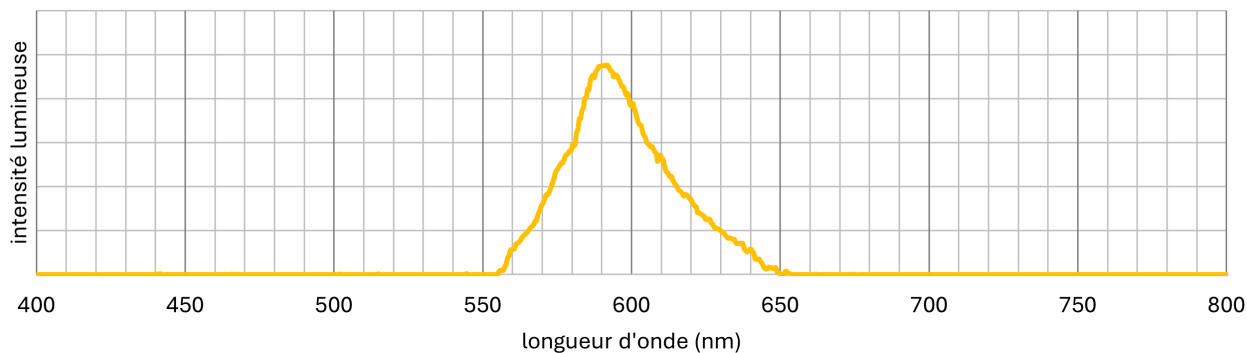


ANNEXE 3 : spectres d'émission des quatre LED utilisées

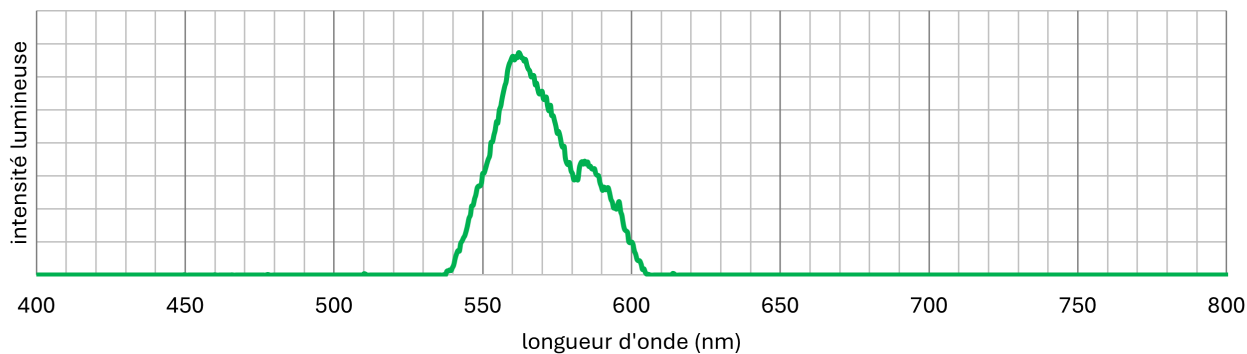
LED **ROUGE** - Spectre en longueur d'onde



LED **JAUNE** - Spectre en longueur d'onde



LED **VERTE** - Spectre en longueur d'onde



LED **BLEUE** - Spectre en longueur d'onde

