

Chapitre 16 : interaction lumière-matière

I) Le photon (rappel de 1^{ère})

- L'énergie des ondes électromagnétiques est quantifiée. Le quantum d'énergie est appelé photon.
- Un photon est une particule élémentaire de masse nulle.
- Un photon se déplace à la vitesse de la lumière c .
- L'énergie E , appelée quantum d'énergie, portée par un photon appartenant à une onde électromagnétique monochromatique est donnée par la relation :

$$E = h \times \nu = h \times \frac{c}{\lambda} \quad \left\{ \begin{array}{l} \nu = f = \text{fréquence de l'onde (en Hz)} \\ \lambda = \text{longueur d'onde de l'onde (en m)} \\ h = \text{constante de Planck } (h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J.s}) \\ E = \text{énergie (en J)} \end{array} \right.$$

Exemple de calcul d'énergie transportée par un photon :

Un photon « rouge » a une longueur d'onde $\lambda = 700 \text{ nm}$. Il se déplace à la vitesse de la lumière $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$

Question : Déterminer la valeur de l'énergie transportée par ce photon (en joule).

Un électron-volt est l'énergie d'un électron soumis à une tension de 1,0 V.

$$1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$$

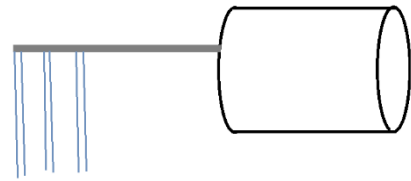
Question : Déterminer la valeur de l'énergie transportée par ce photon (en eV).

II) L'effet photoélectrique. Expérience de Hertz (1887).

1. Analyse d'une expérience reposant sur le principe de l'expérience de Hertz

Vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=WO38qVDGgqw>

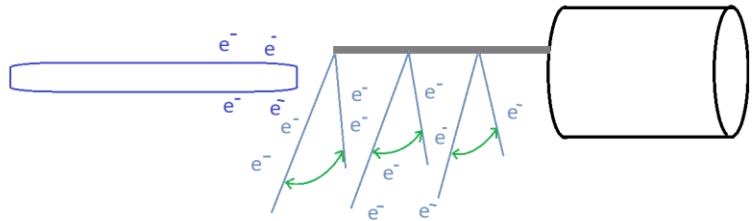
Schéma du montage : Sur une canette en aluminium (métal conducteur) est fixée une tige métallique (conductrice). Sur cette tige des lamelles métalliques pendent.



Etape 1 : un bâton en plastique est frotté avec un papier. Il se charge négativement. Des électrons ont été déposés à sa surface. Le bâton est approché des lamelles métalliques.

Question : Observer et interpréter

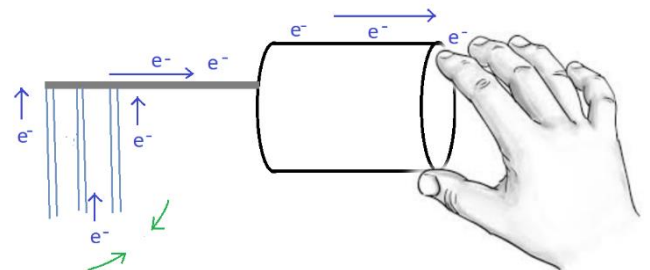
Réponse :



Etape 2 : l'expérimentateur touche la canette.

Question : Observer et interpréter

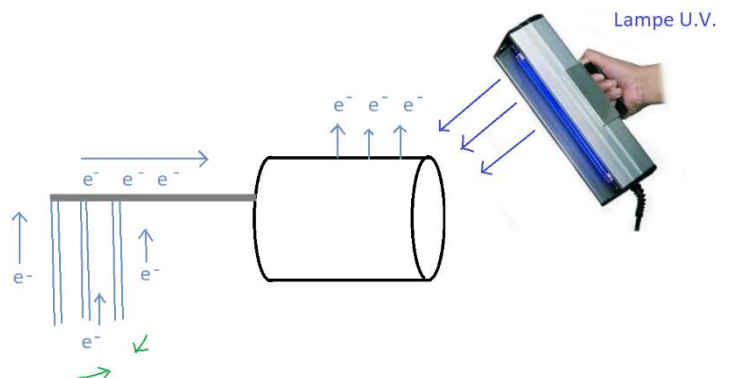
Réponse :



Etape 3 : L'expérimentateur recharge les lamelles et approche une lampe émettant des U.V.

Question : Observer et interpréter

Réponse :



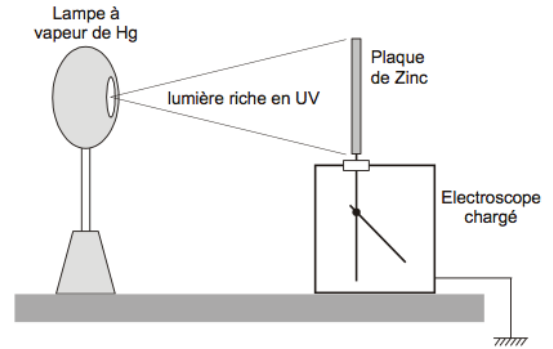
Conclusion : Les électrons ont capté suffisamment d'énergie pour être éjectés du métal. Ce phénomène est appelé effet photoélectrique.

2. Expérience historique de Hertz sur l'effet photoélectrique.

En 1886, Heinrich **Hertz** réalise l'expérience intitulée « effet photoélectrique » : une plaque de zinc, décapée, montée sur un électroscope est chargée, puis éclairée par la lumière émise par une lampe à vapeur de mercure (émettant un rayonnement riche en UV, visible et IR) ou par une lampe à UV.

Etude de deux étapes de cette expérience :

1^{ère} étape : Initialement la plaque de zinc et l'électroscope sont chargés négativement : l'aiguille de l'électroscope dévie. Puis la plaque de zinc est éclairée. L'aiguille revient alors dans sa position initiale.



Interprétation

Lorsque la plaque de zinc est éclairée, l'énergie absorbée par les électrons leur permet d'être éjectés de la plaque métallique.

La plaque se décharge, ainsi que l'aiguille, qui revient dans sa position initiale.

2^{ème} étape : La plaque de zinc est rechargée négativement, l'aiguille de l'électroscope dévie à nouveau. On éclaire à nouveau la plaque mais en interposant entre la source lumineuse et la plaque de zinc, une plaque de verre. On observe que l'aiguille reste dans sa position.

Interprétation :

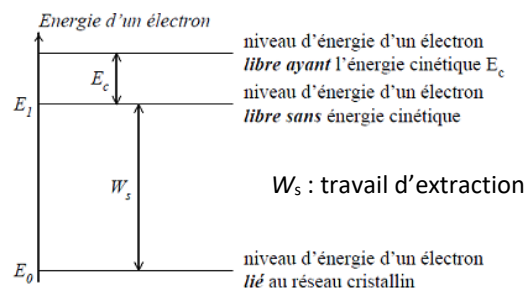
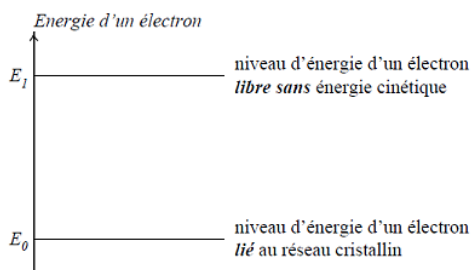
La plaque de verre ne laisse pas passer les radiations ultraviolettes. Les électrons ne sont donc pas arrachés au métal.

Conclusion de l'expérience de Hertz.

Heinrich Hertz a alors découvert que la lumière ultraviolette provoque l'émission d'électrons à partir d'une surface métallique comme le zinc. On peut alors se demander comment on peut extraire un électron d'un métal :

Un métal est constitué par un réseau cristallin d'ions positifs entre lesquels circulent des électrons liés au réseau, mais libres de se déplacer à l'intérieur de ce réseau.

- A l'aide du diagramme énergétique d'un électron, proposer une explication à l'effet photoélectrique. Quelle énergie minimale doit recevoir un électron pour être libéré ?



Le diagramme énergétique illustre que :

- C'est à l'intérieur du métal que l'électron a le moins d'énergie, car il est lié au réseau ;
- Lorsque l'électron a capté l'énergie $E = W_s$, il est sorti du métal, mais il est au repos ($E_c = 0$) ;
- Lorsque l'électron a capté une énergie $E > W_s$, il est sorti du métal et a une énergie cinétique $E_c = E - W_s$.
- Le travail d'extraction W_s est l'énergie minimale que doit recevoir un électron pour être libéré.

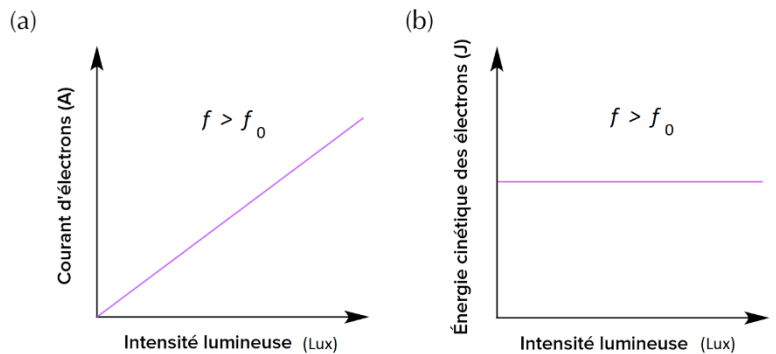
Expérience A : On utilise maintenant le même faisceau lumineux, mais de **plus forte intensité lumineuse**, c'est-à-dire que le nombre de photons heurtant la plaque de zinc est plus élevé.

On mesure l'énergie cinétique des électrons émis et le courant électrique correspondant au nombre de photons émis.

Observation : Graphiques ci-contre.

Interprétation :

- Le courant d'électrons est proportionnel à l'intensité lumineuse reçue par la plaque.
- Par contre l'énergie cinétique des électrons est indépendante de l'intensité lumineuse reçue.

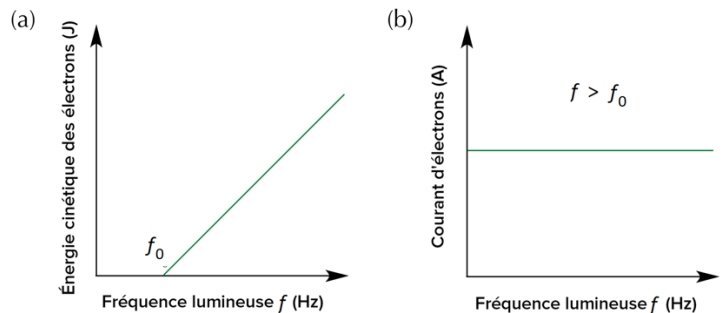


Expérience B : On utilise maintenant un faisceau lumineux, de fréquence plus élevée, mais de même intensité lumineuse que le faisceau lumineux initial.

Observation : Graphique ci-contre.

Interprétation :

- On constate que plus la fréquence de la radiation lumineuse reçue par la plaque est élevée, c'est-à-dire que sa longueur d'onde est plus faible, plus l'énergie cinétique des électrons est élevée.
- Par contre le nombre d'électrons émis est indépendant de la fréquence de la radiation lumineuse reçue par la plaque.



Conclusion de ces expériences :

Si on éclaire une plaque métallique avec une lampe d'intensité plus élevée, il y aura plus d'électrons émis, par contre leur énergie ne sera pas plus élevée.

Si on éclaire une plaque métallique avec une lampe émettant une lumière de fréquence plus élevée, c'est-à-dire de longueur d'onde plus courte, l'énergie des électrons éjectés sera plus élevée, par contre il n'y aura pas plus d'électrons éjectés.

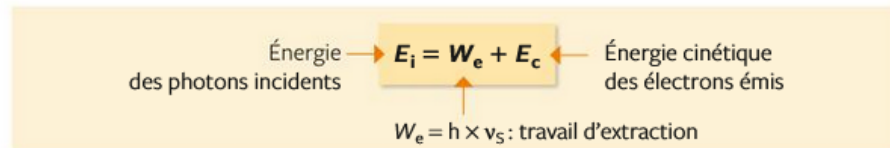
Pour expliquer l'effet photoélectrique, il faut renoncer au modèle ondulatoire de la Physique Classique et recourir au modèle corpusculaire de la lumière (hypothèse d'Einstein, 1905).

Chaque photon transporte l'énergie $E = h \cdot f$ où h représente la constante de Planck.

Bilan :

► **Bilan énergétique :** L'énergie fournie par le rayonnement électromagnétique :

- permet à l'électron de se libérer du métal, c'est le travail d'extraction ;
- donne une énergie cinétique à l'électron libéré.



Cette relation revient à écrire l'égalité suivante :

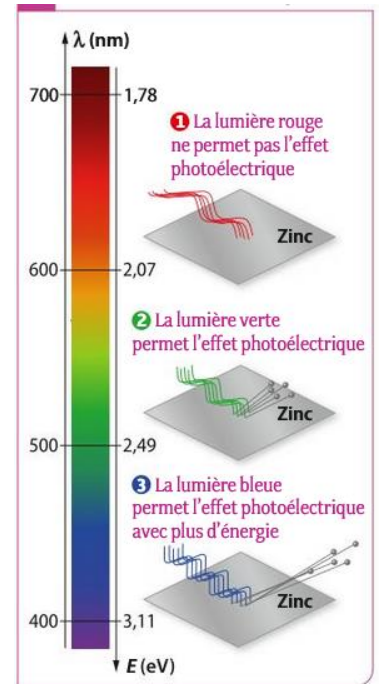
Constante de Planck \rightarrow Fréquence seuil

$$h \times \nu_i = h \times \nu_s + \frac{1}{2} \times m_e \times v_i^2$$

Fréquence incidente \rightarrow Vitesse initiale d'extraction des électrons ou vitesse maximale des électrons émis

$$\frac{1}{2} \times m_e \times v_i^2 = h \times (\nu_i - \nu_s)$$

- **Cas 1 :** $h \times (\nu_i - \nu_s)$ doit être positif donc pour que les électrons soient émis avec une vitesse initiale v_i , $\nu_i > \nu_s$ ou $\lambda_i < \lambda_s$.
- **Cas 2 :** $\nu_i = \nu_s$: l'énergie cinétique initiale des électrons est nulle, les électrons sont extraits du métal mais n'ont pas de vitesse pour le quitter.
- **Cas 3 :** $\nu_i < \nu_s$: situation impossible puisque l'énergie cinétique ne peut être négative. L'effet photoélectrique ne se produit pas et cela ne dépend pas de l'intensité de la source lumineuse qui éclaire le métal.



III) Conditions pour lesquelles on pourra observer un effet photoélectrique avec le métal nickel Ni.

Le travail d'extraction (de sortie) du nickel Ni est égal à $W_s = 4,60 \text{ eV}$.

Si on éclaire ce métal avec une lumière de fréquence égale à $f = 4,50 \times 10^{16} \text{ Hz}$, pourra-t-on observer l'effet photoélectrique ?

Et si oui, quelle sera la valeur de la vitesse des électrons éjectés ?

Données :

$$1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$\text{Masse d'un électron : } m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$\text{Constante de Planck : } h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

Méthode :

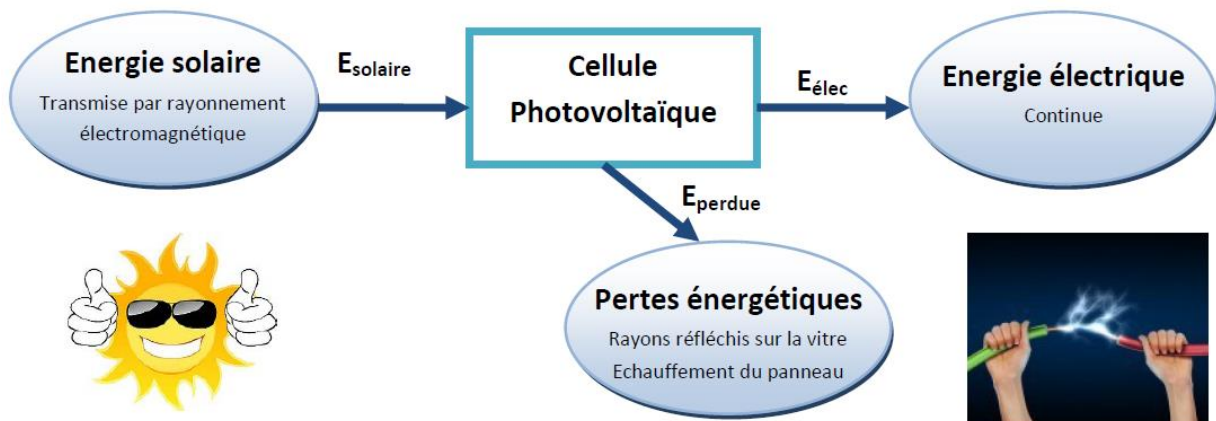
- Détermination de l'énergie du photon incident.
- Comparaison de l'énergie du photon avec la valeur du travail d'extraction du nickel. Conclusion.
- Détermination de l'énergie cinétique d'un électron éjecté.

- Détermination de la vitesse d'un électron éjecté.

IV) Absorption et émission de photons

1) Les cellules photovoltaïques

L'effet photovoltaïque (production d'un courant électrique au sein d'un matériau soumis à un rayonnement électromagnétique) utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en énergie électrique par le biais de la production et du transport dans un matériau **semi-conducteur** de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière.



Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un **excès d'électrons** et l'autre un **déficit en électrons**.

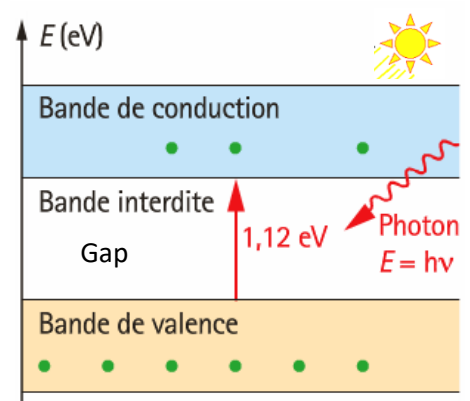
Pour un cristal semi-conducteur, il existe deux bandes d'énergie appelées **bande de conduction** (initialement vide d'électrons) et **bande de valence** (initialement contenant des électrons).

Si ces **deux bandes d'énergies se chevauchent**, le matériau est **conducteur**.

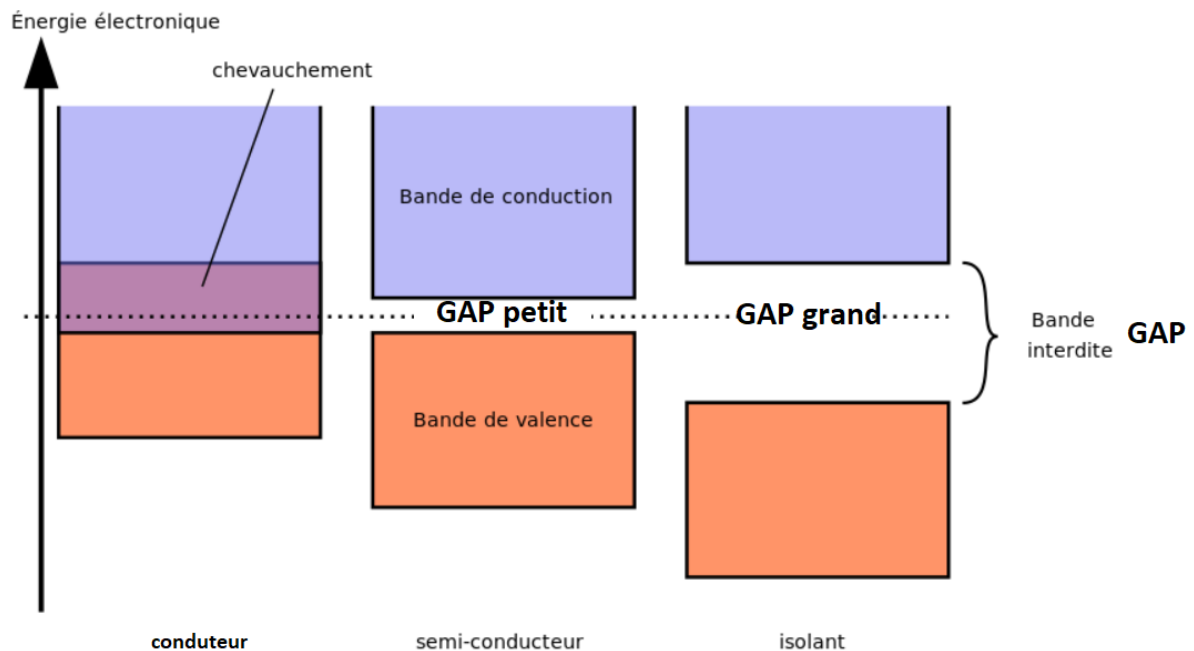
Ces deux bandes sont séparées par une **bande interdite inaccessible aux électrons**.

Pour le silicium cristallin, la largeur de la **bande interdite (gap)**, donc l'énergie E_g minimum nécessaire à l'électron pour passer de la bande de valence à la bande de conduction, est de **1,12 eV**.

C'est la prolifération d'électrons "libres" dans la bande de conduction qui rend le matériau plus conducteur.



Le rayonnement visible et UV émis par le Soleil ont une énergie suffisante pour permettre le passage des électrons de la bande de valence vers la bande de conduction.



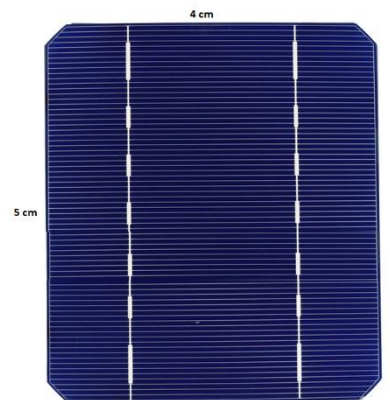
Rendement d'une cellule photovoltaïque

C'est le quotient de la puissance (ou énergie) électrique délivrée par la cellule photovoltaïque par la puissance (ou énergie) lumineuse incidente.

$$\eta = \frac{E_{elec}}{E_{lum}} = \frac{P_{elec}}{P_{lum}}$$

Exemple :

Calculer le rendement de cette cellule photovoltaïque éclairé par une lumière incidente de 800 W/m^2 . La cellule est alimentée en 10V et délivre un courant de 27mA .



2) Diode électroluminescente (DEL ou LED)

Le mot LED est l'acronyme de Light Emitting Diode (Diode Electroluminescente DEL en français). Le symbole de la LED ressemble à celui de la diode mais on y a ajouté deux flèches sortantes pour représenter le rayonnement lumineux émis.



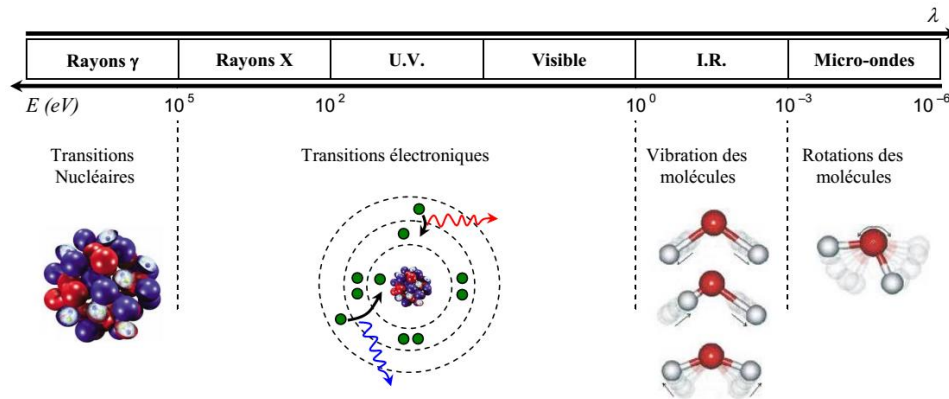
Symbole de la LED.



- Une DEL repose sur le principe de l'électroluminescence qui est le processus inverse de l'effet photovoltaïque.
- Le passage d'un courant électrique dans un semi-conducteur provoque l'émission de lumière par la diode.
- Lorsqu'un électron participant au courant électrique passe de la bande de conduction à la bande de valence, sa diminution d'énergie s'accompagne de la libération d'un photon.

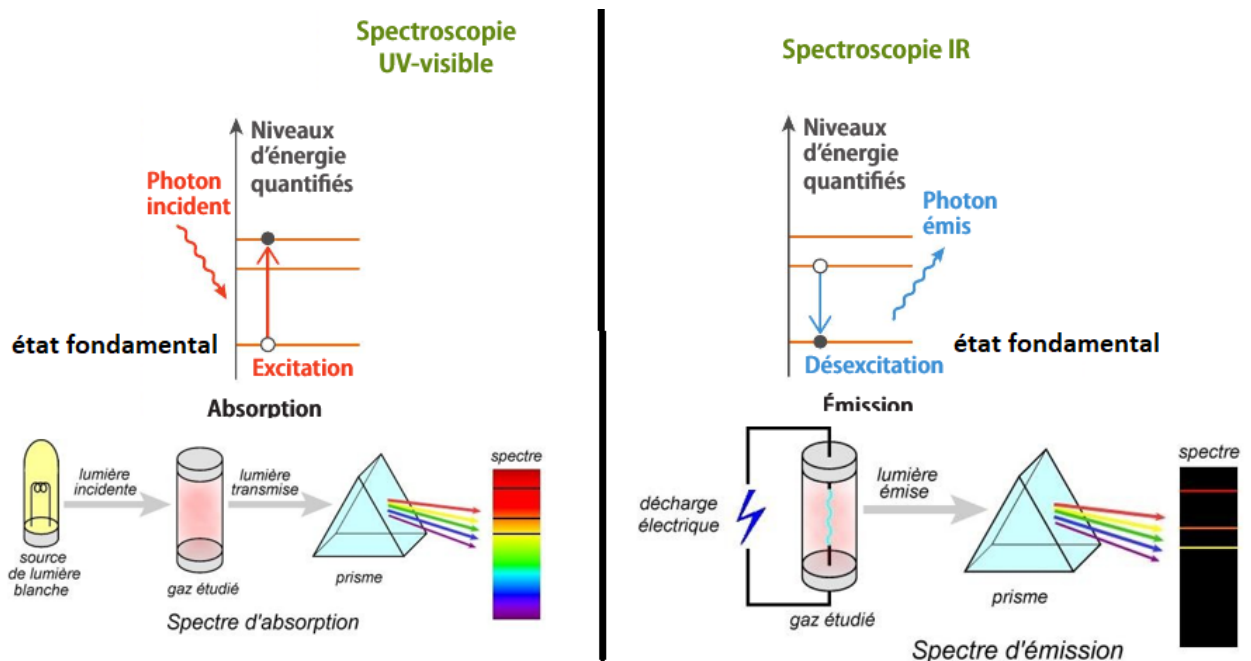
3) Spectroscopie UV-visible, spectroscopie IR

Il existe différents types de transitions énergétiques dans la matière conduisant à des gammes d'énergies émises ou absorbées très différentes :



La spectroscopie est l'étude des spectres d'absorption ou d'émission d'un échantillon soumis à un rayonnement électromagnétique.

En déterminant les longueurs d'onde des photons absorbés ou émis, on détermine les atomes ou liaisons moléculaires qui figurent dans l'échantillon.



Transition entre niveaux d'énergie quantifiés

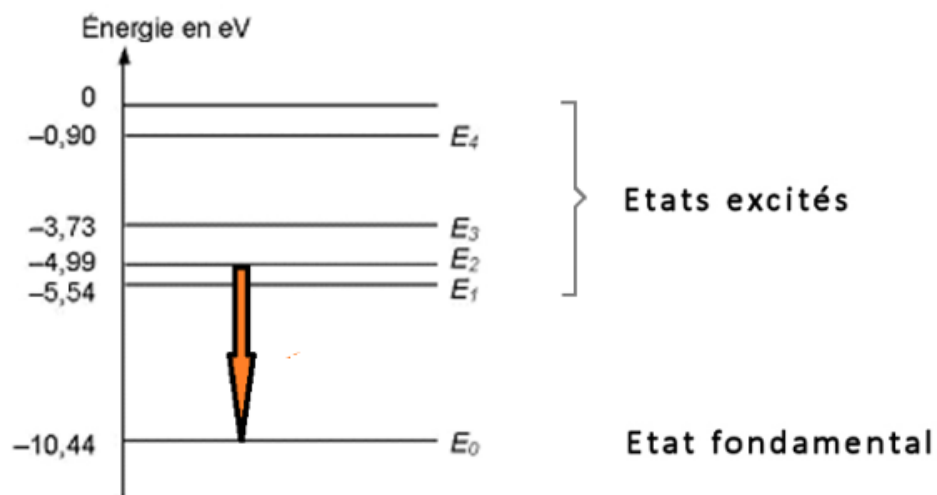
- Absorption ou émission d'un photon de fréquence ν :

$$\Delta E_{12} = E_1 - E_2 = h\nu$$

E_1 et E_2 : niveaux d'énergie d'un électron en joules (J), avec $E_1 > E_2$

ν : fréquence du rayonnement en hertz (Hz)

Exemple de schéma représentant les niveaux énergies des électrons sur les différentes orbites de l'atome de mercure.



Question : Dans le cas du schéma ci-dessus, un photon est-il émis ou absorbé par l'atome ?

Question : Déterminer la valeur de l'énergie du photon (en eV) et de sa longueur d'onde ? Cette radiation est-elle visible ?