

Fiche professeur

THEME du programme : Observer

Sous-thème : Sources de lumière colorée

Interaction lumière – matière : émission, absorption

Type d'activité : Activité documentaire avec débats-bilan, exercices.

Conditions de mise en œuvre :

L'ensemble de cette activité constitue un réinvestissement des connaissances sur la quantification des niveaux d'énergie de la matière et peut donc être proposé aux élèves après avoir découvert cette notion.

La partie 1.1. (l'effet photoélectrique) doit être menée sous la forme d'échanges et de débats en classe entière (durée 1h). Le but est alors d'inciter les élèves à s'exprimer oralement pour confronter leur proposition de réponse.

Le professeur pourra soit faire l'expérience de Hertz, soit projeter l'animation, soit montrer la vidéo.

Animation :

<http://www.physique.edunet.tn/kef/chapitre1effet/I-%20EXPERIENCES%20%20DE%20%20HERTZ.htm>

Vidéo :

<http://video.yahoo.com/watch/616757/2931071>

La suite (parties 1.2 et 2.) peut être traitée comme des exercices illustrant la quantification de l'énergie à faire en classe (1h) ou à faire faire à la maison (0h30 de correction en classe).

Pré-requis :

- Champ électrostatique (première S)
- Modèle corpusculaire de la lumière : le photon (première S)
- Quantification des niveaux d'énergie de la matière (première S)
- Couleur des objets (première S)
- Synthèse additive (première S)

NOTIONS ET CONTENUS	COMPETENCES ATTENDUES
Interaction lumière – matière : émission, absorption	Interpréter les échanges d'énergies entre lumière et matière à l'aide du modèle corpusculaire de la lumière. Connaître les relations $\lambda=c/v$ et $\Delta E=hv$ et les utiliser pour exploiter un diagramme de niveaux d'énergie.

Compétences transversales : (préambule du programme et socle commun)

- mobiliser ses connaissances
- raisonner, argumenter, démontrer
- communiquer à l'oral

Mots clés de recherche : quantification des niveaux d'énergie, photon, effet photoélectrique, lampe à décharge de sodium, fluorescence

Provenance : Académie d'Orléans-Tours

Adresse du site académique : <http://physique.ac-orleans-tours.fr/php5/site/>



TD Chapitre 04 : Interaction lumière matière

De façon générale, les atomes ont tendance à s'associer pour former des molécules stables par mise en commun d'électrons.

Lorsque la lumière arrive sur la matière, ces atomes et molécules peuvent réagir de diverses manières : absorption, fluorescence, transmission, réfraction, réflexion, diffusion.

Nous allons nous intéresser à deux de ces phénomènes : tout d'abord l'absorption par la matière de photons et d'électrons et ensuite la fluorescence.

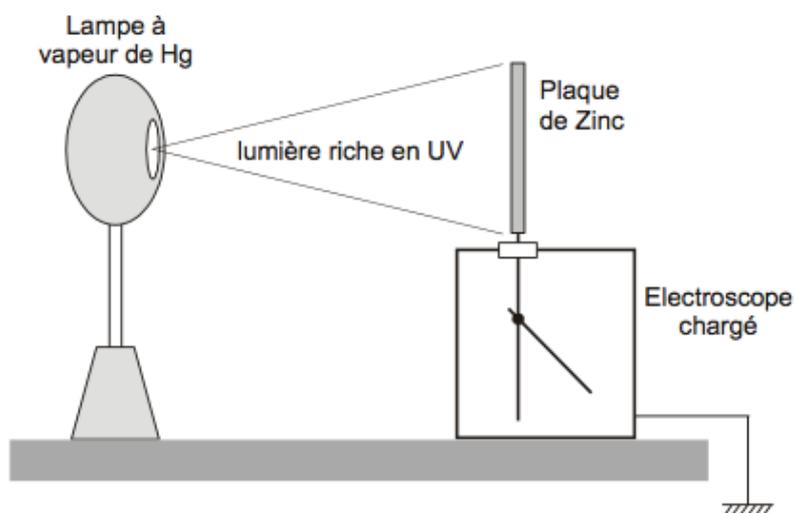
1. L'absorption de la lumière

1.1. L'effet photoélectrique

En 1839, une expérience d'Antoine Becquerel et son fils Alexandre Edmond Becquerel, présentée à l'Académie des Sciences, permet d'observer pour la première fois que si on illumine une électrode d'un dispositif composé de deux électrodes identiques plongées dans un électrolyte, il peut apparaître une différence de potentiel (ou tension électrique) entre ces deux électrodes d'environ 10^{-4} V.

1.1.1. Expérience de Hertz (1887)

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.



L'expérience comporte trois étapes :

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. Que peut-on observer ?

2^{ème} étape : La plaque de zinc est rechargée négativement et une plaque de verre est interposée entre la lampe et le zinc.

Que peut-on observer lorsque la lampe est allumée ?

Que peut-on observer lorsqu'ensuite la plaque de verre est retirée ?

3^{ème} étape : La plaque de zinc est chargée positivement, puis éclairée : que peut-on observer ?



1.1.2. Interprétation de l'expérience de Hertz

La lumière, éclairant la plaque de zinc, permet d'extraire des électrons du métal : c'est l'effet photoélectrique.

1^{ère} étape : les électrons, une fois extraits de la lame, sont repoussés par la lame qui se charge positivement. Les charges négatives de l'électroscope viennent neutraliser les charges positives de la lame : la décharge s'effectue.

3^{ème} étape : la plaque de zinc, chargée positivement, attire les électrons émis : la décharge n'est pas observée.

2^{ème} étape : la lumière ayant traversé le verre n'avait plus l'énergie nécessaire (le rayonnement ultraviolet a été absorbé par le verre) pour extraire des électrons du zinc.

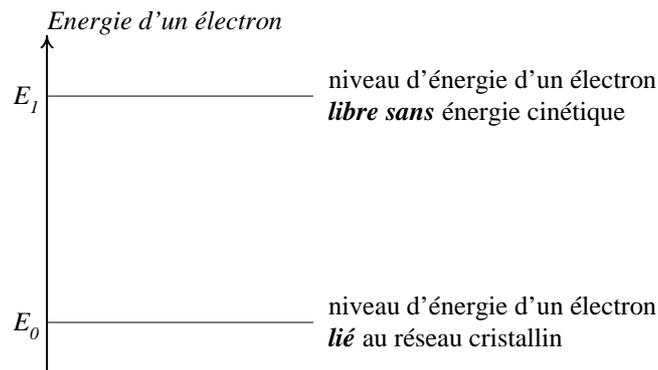
1.1.3. Conclusion de l'expérience de Hertz

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 ?
- L'énergie cinétique de l'électron libéré dépend-elle de l'intensité de la lumière ?

Ce sont les deux observations de H. Hertz qui contrastent avec la théorie de la lumière généralement admise à l'époque : la lumière est une onde (c'est la théorie qui permet d'expliquer une grande partie des phénomènes dans lesquels la lumière intervient comme la diffraction, les interférences ...).

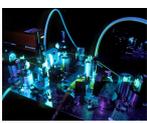
1.1.4. Insuffisance du modèle ondulatoire : modèle corpusculaire

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).

Modèle corpusculaire de la lumière (hypothèse d'Einstein) :

Un rayonnement électromagnétique de fréquence ν peut être considéré comme un faisceau de particules : les photons. Chaque photon transporte l'énergie $E = h \cdot \nu$ où h représente la constante de Planck.

Albert EINSTEIN (1879/1955), physicien allemand, reçoit en 1921 le prix Nobel de physique pour son apport à la physique théorique et particulièrement son explication de l'effet photoélectrique.



1.1.5. Interprétation de l'effet photoélectrique à l'aide du modèle corpusculaire

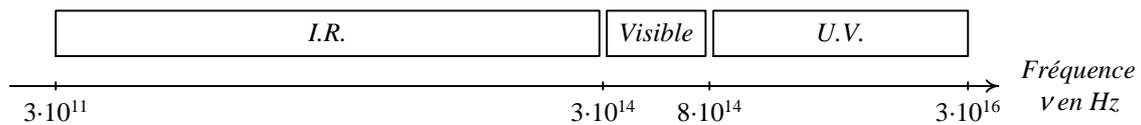
- Comment un électron peut-il acquérir de l'énergie pour devenir libre ?

Existence d'un seuil photoélectrique

- Quels sont les trois cas envisageables lorsqu'un électron absorbe un photon ?

Retour sur l'expérience de Hertz :

- Calculer la fréquence de seuil du métal zinc pour en extraire un électron sachant que l'énergie nécessaire pour libérer un électron d'un atome de zinc et le transformer en ion zinc Zn^+ est $9,394 \text{ eV}$ (cette énergie est appelée énergie de première ionisation).
- A quel type de rayonnement cette fréquence correspond-elle ?



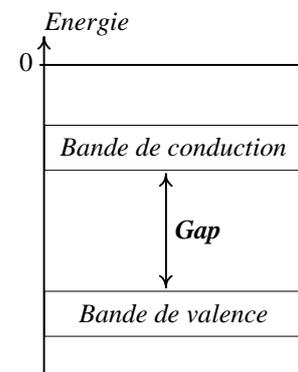
- Est-ce en accord avec l'expérience de Hertz ?

1.1.6. Application de l'effet photoélectrique

Le soleil est une source d'énergie inépuisable, l'exploitation de son rayonnement pour produire de l'électricité a été possible par la compréhension de l'effet photoélectrique : un panneau photovoltaïque convertit une partie de l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrique.

Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour la fabrication de panneaux photovoltaïques. Il fait partie de la famille des matériaux semi-conducteurs dont le diagramme d'énergie des électrons est du type schématisé ci-contre.

En effet, en physique du solide, les bandes de valence et de conduction modélisent des valeurs d'énergie que peuvent prendre les électrons d'un semi-conducteur à l'intérieur de celui-ci. De façon générale, ces électrons n'ont la possibilité de prendre que des valeurs d'énergie comprises dans certains intervalles, lesquels sont séparés par des "bandes" d'énergie interdites. Cette modélisation conduit à parler de **bandes d'énergie**.



La *bande de valence* est la dernière bande de basse énergie contenant des électrons.

La *bande de conduction* est la première bande de haute énergie vide d'électrons.

Pour le silicium, l'énergie nécessaire (*Gap*) pour faire passer un électron de la bande de valence à la bande de conduction est de $1,12 \text{ eV}$.

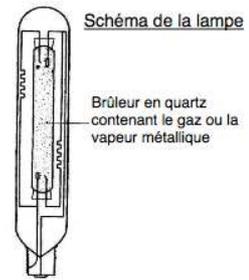
- Calculer la fréquence minimale du rayonnement permettant de faire passer un électron de la bande de valence à la bande de conduction.
- A quels rayonnements les panneaux photovoltaïques en silicium sont-ils sensibles ?

L'effet photovoltaïque illustre l'interaction de photons avec la lumière ce qui entraîne l'émission d'électrons. Nous allons maintenant étudier l'interaction d'électrons avec la matière.

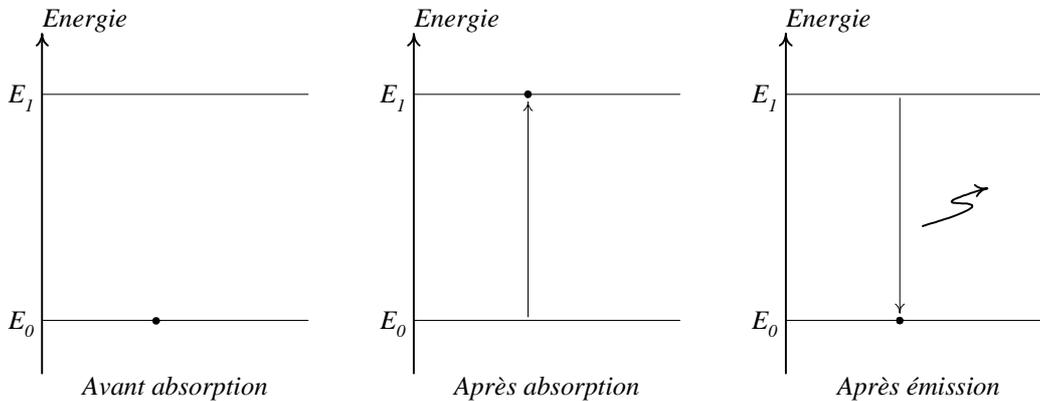


1.2. Lampe à décharge de sodium

Ces types de lampe produisent de la lumière grâce à une décharge électrique dans un gaz, ici de la vapeur de sodium.



- Commenter chacun de ces trois diagrammes d'énergie afin d'expliquer l'émission de lumière par une lampe à décharge de sodium.



- Sachant que l'énergie de l'état fondamental est $E_1 = -5,14 \text{ eV}$ et que l'énergie du premier état excité est $E_2 = -3,03 \text{ eV}$, calculer la longueur d'onde de la radiation émise.
- A quel domaine de rayonnement appartient cette radiation ?

2. La fluorescence

2.1. Cas général

Lorsque de la lumière incidente d'énergie E_{inc} arrive sur une matière fluorescente, une partie de cette énergie est gardée par la matière. Le reste, E_{em} , est réémis sous forme d'un rayonnement, le tout dans un bref intervalle de temps.

- Laquelle de ces deux énergies (E_{inc} ou E_{em}) est la plus grande ?
- Comparer les longueurs d'onde des radiations absorbées λ_{inc} et émises λ_{em} .
- Quelle est alors la particularité de la fluorescence ?

2.2. Cas d'un agent azurant

Un agent azurant est une molécule qui absorbe les rayonnements électromagnétiques ultraviolets entre 300 et 400 nm de longueur d'onde et réémet ensuite cette énergie par fluorescence dans le visible entre 400 et 500 nm.

Le premier agent azurant à être utilisé industriellement a été le méthylumbelliféron.

Lorsque l'on éclaire le méthylumbelliféron avec une radiation ultraviolette à $\lambda_{inc} = 340 \text{ nm}$. La molécule garde une énergie de 0,764 eV puis réémet une radiation de longueur d'onde λ_{em} .

- Déterminer λ_{em} . A quel type de rayonnement correspond cette longueur d'onde ?

Certaines fibres naturelles telles la cellulose ont tendance à absorber dans le bleu et ont par conséquent un aspect jaunâtre.

- Pourquoi l'utilisation d'un agent azurant comme le méthylumbelliféron dans une lessive permet-elle de donner au linge un « éclat de blancheur ».

Données :

- Constante de Planck : $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$;
- $1,0 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.



2.3. Applications

- ✓ poudres fluorescentes utilisées dans les tubes fluorescents pour donner le fond continu au spectre de raies ;
- ✓ jouets pour enfants ;
- ✓ aiguilles de montre.

Chapitre 02 : Interaction lumière matière

Compétences attendues

Interpréter les échanges d'énergie entre la lumière et matière à l'aide du modèle corpusculaire de la lumière.

Connaître les relations $\lambda = c/\nu$ et

$\Delta E = h\nu$ et les utiliser pour exploiter un diagramme de niveaux d'énergie.

L'interprétation magistrale de M. Einstein

Le phénomène pointé par Hertz ne pouvait s'expliquer à la lumière de la physique classique, qui considère le rayonnement électromagnétique comme une onde ; toute puissante, la physique héritée de Newton et Maxwell est tenue en échec sur quelques problèmes épineux en ce début de XX^{ème} siècle, malgré le talent de physiciens remarquables.

En 1905, Albert Einstein, alors modeste employé du bureau des brevets de Berne, publie quatre articles qui révolutionneront la physique ; dans l'un de ces articles, il parvient à interpréter les observations de Hertz grâce à la théorie des quanta, formulée quelques années plus tôt par le physicien allemand Max Planck. Il propose en effet de concevoir la lumière comme un flux de particules (que le chimiste Gilbert Lewis appellera **photons** en 1926), dotées d'une énergie dépendant de la longueur d'onde du rayonnement, et non de son intensité.

Ainsi, chaque photon possède une énergie E qui, exprimée en joules¹, est multiple d'un quantum d'énergie h et proportionnelle à la fréquence de l'onde associée,

$$E = h \nu$$

où h est une constante aujourd'hui appelée *constante de Planck* et ν (la lettre grecque « nu ») la fréquence du rayonnement électromagnétique (exprimée en hertz).

La fréquence ν du rayonnement est reliée à sa longueur d'onde λ par la relation

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

où c est la célérité de la lumière dans le vide.

Données : $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ J.s ; $c = 3,00 \cdot 10^8$ m.s⁻¹ ; l'énergie E est à l'échelle corpusculaire souvent exprimée en électrons-volts (eV) : $1 \text{ eV} = e \text{ J}$ où $e = 1,612 \cdot 10^{-19}$ C est la charge électrique élémentaire.

Einstein comprit que l'effet photoélectrique se traduit par l'absorption de certains photons par le métal : si l'énergie d'un photon est supérieure à l'énergie liant un électron à un atome du métal, cet électron peut alors quitter son orbitale atomique, acquérant une énergie cinétique et participant potentiellement à un courant électrique. C'est pour ses travaux sur l'effet photoélectrique qu'Einstein reçut le prix Nobel de Physique en 1921 et qu'il contribua fortement, par ses explications, au développement de la théorie quantique.

¹ Les énergies mises en jeu justifient l'utilisation de l'électron-volt : $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19}$ J



Chapitre 02 : Interaction lumière matière

Spectre de raies d'émission et désexcitation atomique :

D'après ce qui a été dit ci-dessus, le spectre de raies d'émission observé pour un atome rend compte directement de la quantification de l'énergie de cet atome.

Une raie du spectre correspond à une désexcitation de l'atome d'un niveau d'énergie à un autre.

Quantum d'énergie associé à la désexcitation ⁽³⁾ :

En effet, si un atome se désexcite et passe d'un niveau d'énergie E_f à un niveau d'énergie E_i , il émet une radiation monochromatique de fréquence ν qui vérifie :

$$\Delta E = E_f - E_i = h\nu = \frac{h \times c}{\lambda}$$

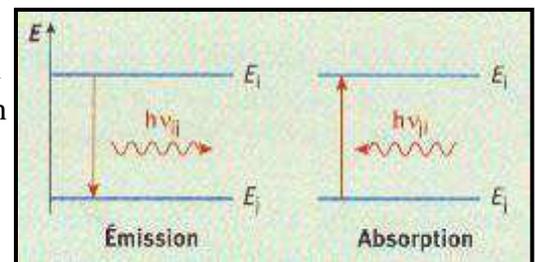
ΔE : quantum d'énergie correspondant à la désexcitation (J)
 E_i : énergie du niveau excité de **départ** (J)
 E_f : énergie du niveau excité ou fondamental d'**arrivée** (J)
h : constante de Planck = 6.62×10^{-34} J.s
 ν : fréquence de la radiation émise (Hz)
 λ : longueur d'onde de la radiation (m)
 c : vitesse de la lumière dans le vide = 3.0×10^8 m/s

En 1905, Einstein postule que **ces quanta d'énergie sont portés par des particules de masse nulle, non chargées se propageant à la vitesse de la lumière $c = 3,0 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ dans le vide ; ces particules sont appelées « photon ».**

Rq : Les différents niveaux d'énergie d'un atome sont plutôt donnés en eV qu'en joules, il convient donc de savoir effectuer des conversions entre ces deux unités d'énergie :

$$\boxed{1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}}$$

Rq : De la même manière qu'un atome qui se désexcite émet une radiation monochromatique, on peut faire passer un atome de son état fondamental à un état excité en lui soumettant une radiation monochromatique :



Généralisation

La notion de niveaux d'énergie s'applique à tout système microscopique : noyau, atomes, molécules. La relation $\Delta E = h\nu$ concerne toute transition associée à un rayonnement électromagnétique.

a. Niveaux d'énergie électroniques :

Un atome possède de **l'énergie du fait de l'interaction des électrons entre eux et avec le noyau**. Cette énergie d'interaction et l'énergie cinétique des électrons constituent l'énergie électronique de l'atome.

$$qq \text{ eV} < \Delta E < qq \text{ keV}$$

b. Niveaux d'énergie nucléaire

Le noyau possède de l'énergie du fait de **l'interaction entre les nucléons (interaction forte)**. Lors d'une désintégration, le noyau fils naît dans un état excité noté Y^* . Il retourne ultérieurement dans un état stable Y en émettant un rayonnement γ . Cette émission correspond à un changement de niveau d'énergie du noyau atomique. Le rayonnement γ présente un spectre de raies : l'énergie du noyau est quantifiée.



$$E_\gamma = h\nu_\gamma = \frac{h \times c}{\lambda_\gamma} = E_{Y^*} - E_Y \quad \lambda_\gamma \approx 10^{-12} \text{ m donc } E_\gamma \approx \text{MeV}$$

Fluorescence:

Une matière fluorescente absorbe une partie de la lumière qu'elle reçoit et émet une lumière de fréquence plus petite et de longueur d'onde plus grande que celle absorbée.

E_1 : énergie de la lumière incidente

E_2 : énergie de la lumière restituée

avec $E_2 < E_1$ puisqu'une partie de l'énergie est absorbée $\Rightarrow \lambda_2 > \lambda_1$

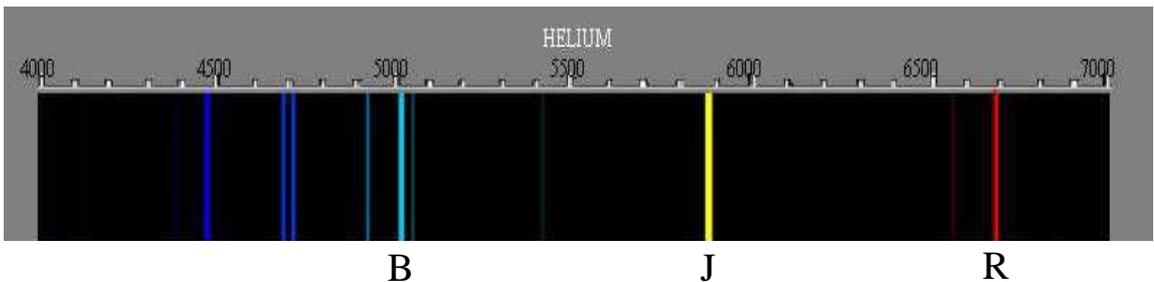
Ainsi une absorption dans une couleur pourra conduire à l'émission d'une autre couleur.

Applications :

- poudres fluorescentes utilisées dans les tubes fluorescent pour donner le fond continu au spectre de raies
- les azurants optiques pour la lessive ou le papier : une absorption dans l'ultraviolet conduit à une émission lumineuse dans le bleu.: les couleurs deviennent plus lumineuses :

APPLICATION

Voici le spectre de raies d'émission de l'hélium :

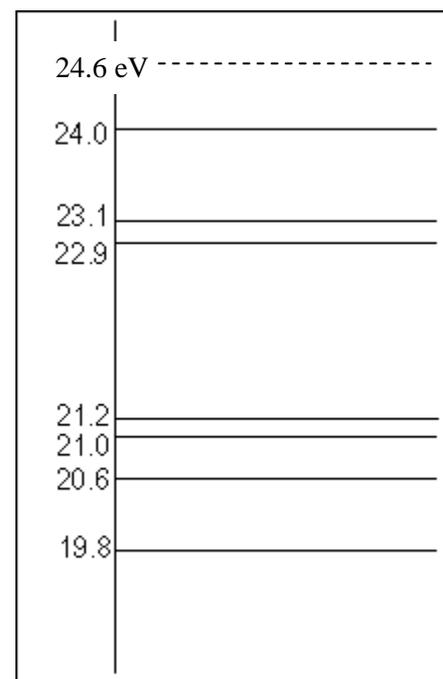


On remarque que celui-ci est composé de trois raies intenses :

Une raie bleue (B) de longueur d'onde 502 nm, une raie jaune (J) à 588 nm, et une raie rouge (R) à 668 nm.

1) Retrouvez à partir de ces trois raies, la valeur du quantum d'énergie auxquelles elles correspondent, et remplissez le tableau ci-dessous ^{(4) et (5)} :

Couleur	λ (en nm)	ΔE (en J)	ΔE (en eV)
Bleu			
Jaune			
Rouge			

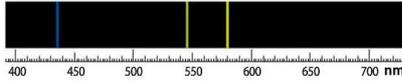


2) Nous savons que ces trois émissions correspondent toutes à un état excité initial d'énergie égale à 23,1 eV. Déterminez le niveau final de désexcitation correspondant à chacune des trois raies précédentes du spectre et représentez ces changements d'énergie dans les atomes d'hélium par des flèches (une pour chaque raie) dans le diagramme ci-contre :



12 Spectre d'émission du mercure

Le spectre d'émission du mercure contient trois raies intenses : jaune, verte et bleu indigo, de longueurs d'onde respectives $\lambda_j = 579,2$ nm, $\lambda_v = 546,2$ nm et $\lambda_b = 436,0$ nm.



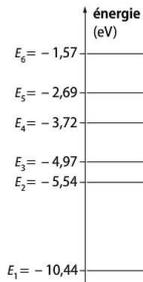
1. Calculer l'énergie, en eV, des photons de longueurs d'onde λ_j , λ_v et λ_b .

2. Le diagramme simplifié des niveaux d'énergie de l'atome de mercure est donné ci-contre.

a. Quelle raie d'émission du mercure correspond à la désexcitation des atomes de mercure des niveaux d'énergie E_6 à E_4 ?

b. À quelles désexcitations correspondent les deux autres raies ? Justifier.

c. Reproduire le diagramme et représenter par des flèches les trois désexcitations évoquées dans l'exercice.



12 1.

$\Delta E = h \cdot c / \lambda$	$\lambda_j = 579,2$ nm	$\lambda_v = 546,2$ nm	$\lambda_b = 436,0$ nm
	2,15 eV	2,28 eV	2,85 eV

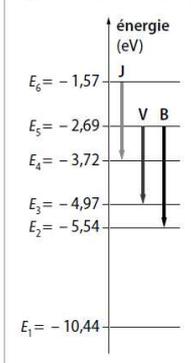
2. a. La désexcitation des atomes de l'état d'énergie E_6 vers celui d'énergie E_4 libère un photon d'énergie $\Delta E = E_6 - E_4 = -1,57 - (-3,72) = 2,15$ eV correspondant à la raie jaune ($\lambda_j = 579,2$ nm) d'émission du mercure.

b. La désexcitation des atomes de l'état d'énergie E_5 vers celui d'énergie E_3 libère un photon d'énergie $\Delta E = E_5 - E_3 = -2,69 - (-4,97) = 2,28$ eV correspondant à la raie verte ($\lambda_v = 546,2$ nm) d'émission du mercure.

La désexcitation de l'état d'énergie E_6 vers celui d'énergie E_2 libère un photon d'énergie $\Delta E = E_6 - E_2 = -1,57 - (-5,54) = 3,97$ eV correspondant à la raie bleu indigo ($\lambda_b = 436,0$ nm) d'émission du mercure.

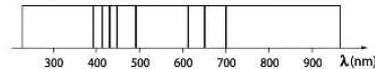
c. Voir figure ci-contre.

Figure de la question 2. c

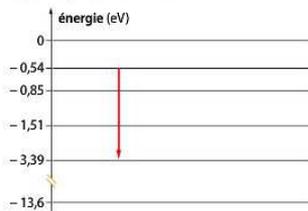


20 Étude d'une étoile filante

Dans la nuit du 12 au 13 mai 2002, alors qu'ils observaient une supernova dans une galaxie éloignée à l'aide du VLT (Very Large Telescope, situé à l'observatoire de Paranal au Chili), des astronomes ont eu la chance d'observer une étoile filante traverser le champ du télescope. Ils ont ainsi pu enregistrer le spectre de la lumière émise, dont voici une partie :



On donne le diagramme d'énergie d'un des éléments mis en évidence par le spectre obtenu :



1. Reproduire le spectre obtenu et y indiquer les domaines de la lumière visible, des rayonnements infrarouges et ultraviolets.

2. Que représente la flèche sur le diagramme d'énergie ? La raie correspondante est-elle une raie d'émission ou d'absorption ? Justifier.

3. a. Déterminer l'énergie d'un photon de cette raie.

b. En déduire la valeur de la longueur d'onde dans le vide de cette raie.

c. Identifier l'élément mis en évidence par cette raie.

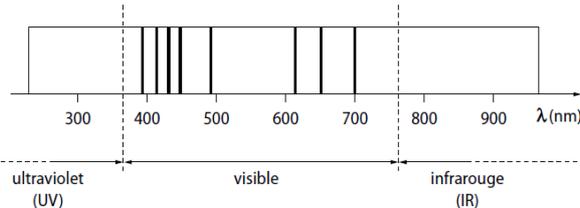
Données. Quelques longueurs d'onde de raies (en nm) :

- pour l'azote : 396 - 404 - 424 - 445 - 463 - 480 - 505 - 550 - 575 - 595 - 648 - 661.

- pour l'oxygène : 391 - 397 - 420 - 442 - 465 - 616 - 700.

- pour l'hydrogène : 397 - 412 - 436 - 486 - 656.

20 1.



2. La flèche représente le passage d'un atome d'un état d'énergie à un autre état. La raie correspondante est une raie d'émission, car l'atome passe d'un niveau d'énergie supérieur à un niveau d'énergie inférieur. Il se désexcite en émettant un photon.

3. a. L'énergie du photon correspond à l'énergie cédée par l'atome, soit $\Delta E = -0,54 - (-3,39) = 2,85$ eV.

b. $\Delta E = h \cdot c / \lambda$ soit $\lambda = h \cdot c / \Delta E$, avec $\Delta E = 2,85$ eV = $2,85 \times 1,60 \times 10^{-19}$ J = $4,56 \times 10^{-19}$ J.

D'où $\lambda = 6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8 / (4,56 \times 10^{-19}) = 4,36 \times 10^{-7}$ m = 436 nm.

c. Cette raie appartient à l'élément hydrogène, car son spectre est le seul à contenir une raie à 436 nm.



23 ★ **Dioxyde de soufre et pollution**

Le dioxyde de soufre est un gaz dont la présence dans l'atmosphère terrestre est due aux éruptions volcaniques et aux rejets de certaines industries. Dangereux pour l'environnement et pour la santé humaine, il est l'une des causes de la pollution de l'air.

Pour déterminer la concentration en dioxyde de soufre de l'air ambiant, on le soumet à un rayonnement ultraviolet de longueur d'onde $\lambda' = 214$ nm. Les molécules de dioxyde de soufre, initialement dans leur état fondamental stable d'énergie E_0 , sont alors portées vers un état d'énergie E' . Cet état étant instable, le dioxyde de soufre se désexcite très rapidement vers un état d'énergie E'' (différent de E_0) en émettant un rayonnement de longueur d'onde $\lambda'' = 341$ nm.

La mesure de l'intensité de ce rayonnement permet de déterminer la concentration en dioxyde de soufre de l'air analysé.

1. Comment qualifie-t-on les états d'énergie E' et E'' de la molécule de dioxyde de soufre ?
2. À l'aide des informations du texte, placer sur un diagramme les états d'énergie E_0 , E' et E'' , en justifiant la démarche.
3. a. Le passage de la molécule de l'état d'énergie E_0 à celui d'énergie E' correspond-il à une émission ou à une absorption de lumière ? Justifier.
b. Représenter sur le diagramme cette transition par une flèche notée 1.
c. Calculer, en eV, la variation d'énergie ΔE_1 correspondant à la transition entre les niveaux E_0 et E' .
4. Au cours du passage de la molécule de l'état d'énergie E' à celui d'énergie E'' , elle échange avec l'extérieur une quantité d'énergie $\Delta E_2 = 3,65$ eV.
a. Représenter sur le diagramme cette transition par une flèche notée 2.
b. Déterminer, en nm, la longueur d'onde λ'' de la radiation émise.
c. Dans quel domaine du spectre se situe-t-elle ?

EN ROUTE VERS LA TERMINALE

23 1. Les états d'énergie E' et E'' de la molécule de dioxyde de soufre sont des états excités.

2. L'état fondamental correspond à l'état de plus basse énergie : $E' > E_0$.

La molécule de SO_2 étant dans l'état d'énergie E' se désexcite et passe à l'état d'énergie E'' , donc $E'' < E'$.

3. a. Le passage de l'état fondamental à un état excité est une absorption, car $E' > E_0$.

b. Voir figure ci-contre.

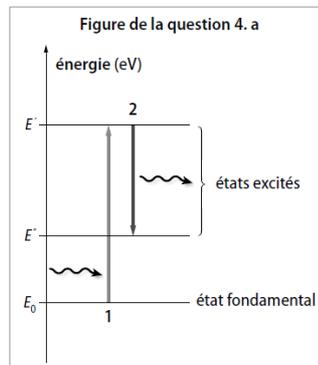
c. $\Delta E_1 = E' - E_0 = h \cdot c / \lambda'$,
soit $\Delta E_1 = 6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8 / (214 \times 10^{-9})$
 $\Delta E_1 = 9,29 \times 10^{-19} = 5,81$ eV.

4. a. Voir figure ci-contre.

b. $\Delta E_2 = E' - E'' = h \cdot c / \lambda''$ soit $\lambda'' = h \cdot c / \Delta E_2$
avec $\Delta E_2 = 3,65$ eV = $5,84 \times 10^{-19}$ J.

D'où $\lambda'' = 6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8 / (5,84 \times 10^{-19}) = 3,41 \times 10^{-7}$ m = 341 nm.

c. Cette radiation est dans le domaine de l'ultraviolet car $\lambda'' < 380$ nm.





Chapitre 02 : Interaction lumière matière

Document professeur

De façon générale, les atomes ont tendance à s'associer pour former des molécules stables par mise en commun d'électrons.

Lorsque la lumière arrive sur la matière, ces atomes et molécules peuvent réagir de diverses manières : absorption, fluorescence, transmission, réfraction, réflexion, diffusion.

Nous allons nous intéresser à deux de ces phénomènes : tout d'abord l'absorption par la matière de photons et d'électrons et ensuite la fluorescence.

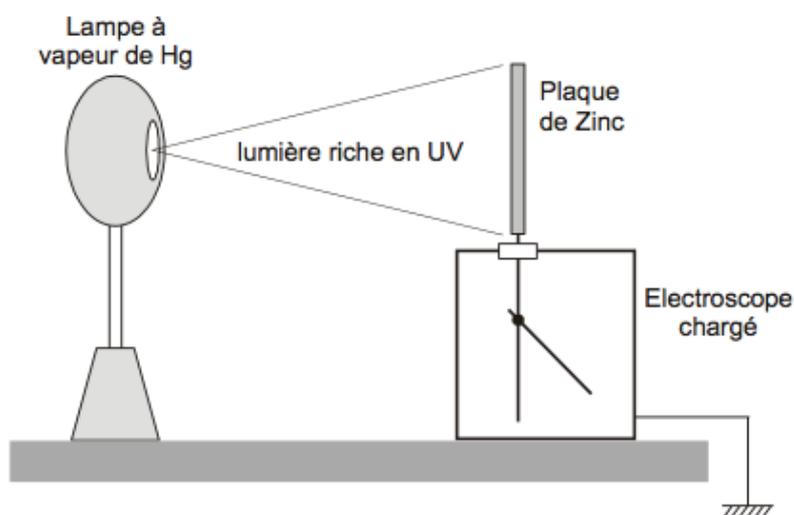
1. L'absorption de la lumière

1.1. L'effet photoélectrique

En 1839, une expérience d'Antoine Becquerel et son fils, présentée à l'Académie des Sciences, permet d'observer pour la première fois que le comportement électrique d'électrodes de platine et de cuivre immergées dans une solution électrolytique acide est modifié par un éclairage.

1.1.1. Expérience de Hertz (1887)

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.



L'expérience comporte trois étapes :

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. Que peut-on observer ?

Décharge de l'électroscope.

2^{ème} étape : La plaque de zinc est rechargée négativement et une plaque de verre est interposée entre la lampe et le zinc.

Que peut-on observer lorsque la lampe est allumée ? **Pas de décharge de l'électroscope.**

Que peut-on observer lorsqu'ensuite la plaque de verre est retirée ? **Décharge de l'électroscope.**

3^{ème} étape : La plaque de zinc est chargée positivement, puis éclairée : que peut-on observer ?

Pas de décharge de l'électroscope.



1.1.2. Interprétation de l'expérience de Hertz

La lumière, éclairant la plaque de zinc, permet d'extraire des électrons du métal : c'est l'effet photoélectrique.

1^{ère} étape : les électrons, une fois extraits de la lame, sont repoussés par la lame qui se charge positivement. Les charges négatives de l'électroscope viennent neutraliser les charges positives de la lame : la décharge s'effectue.

3^{ème} étape : la plaque de zinc, chargée positivement, attire les électrons émis : la décharge n'est pas observée.

2^{ème} étape : la lumière ayant traversé le verre n'avait plus l'énergie nécessaire (le rayonnement ultraviolet a été absorbé par le verre) pour extraire des électrons du zinc.

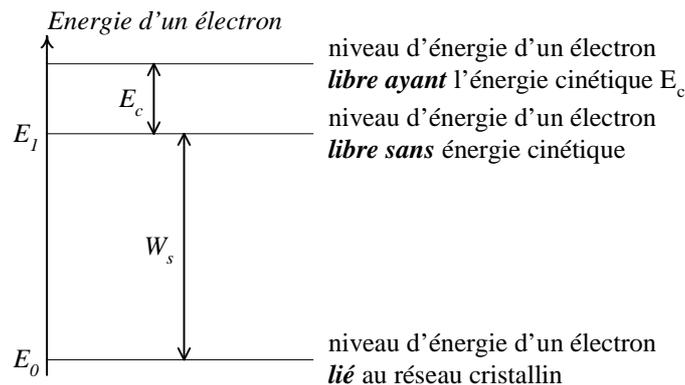
1.1.3. Conclusion de l'expérience de Hertz

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.



Pour extraire un électron, il faut lui fournir une énergie W_s , appelée **travail de sortie** ou **travail d'extraction** (W_s représente l'énergie de liaison de l'électron au réseau métallique).

Schéma complété lors de la mise en commun.

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 $E_c = E - W_s$.

- Quelle énergie minimale doit recevoir un électron pour être libéré ?

On pourrait s'attendre à ce qu'un faisceau de forte puissance apporte l'énergie suffisante pour extraire des électrons. Mais l'expérience montre qu'il existe une valeur minimale d'énergie caractéristique de la surface métallique, en dessous de laquelle aucun électron n'est éjecté, quelle que soit l'intensité de la radiation.

- L'énergie cinétique de l'électron libéré dépend-elle de l'intensité de la lumière ?

L'énergie cinétique des électrons éjectés ne dépend pas de l'intensité de la lumière uniquement de l'énergie captée.

Ce sont les deux observations de H. Hertz qui contrastent avec la théorie de la lumière



généralement admise à l'époque : la lumière est une onde (c'est la théorie qui permet d'expliquer une grande partie des phénomènes dans lesquels la lumière intervient comme la diffraction, les interférences ...).

1.1.4. Insuffisance du modèle ondulatoire : modèle corpusculaire

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).

Modèle corpusculaire de la lumière (hypothèse d'Einstein) :

Un rayonnement électromagnétique de fréquence ν peut être considéré comme un faisceau de particules : les photons. Chaque photon transporte l'énergie $E = h \cdot \nu$ où h représente la constante de Planck.

Albert EINSTEIN (1879/1955), physicien allemand, reçoit en 1921 le prix Nobel de physique pour son apport à la physique théorique et particulièrement son explication de l'effet photoélectrique.

1.1.5. Interprétation de l'effet photoélectrique à l'aide du modèle corpusculaire

- Comment un électron peut-il acquérir de l'énergie pour devenir libre ?

Considérons un photon d'énergie $E = h \cdot \nu$ pénétrant dans un métal. Sur son parcours, il peut éventuellement rencontrer un électron et être absorbé par l'électron. Il cède alors toute son énergie à l'électron. Le phénomène est quasi instantané ($< 10^{-9}$ s) : l'électron passe à un niveau excité.

L'effet photoélectrique est une interaction entre un photon (la lumière) et un électron (la matière).

Que devient cet électron ?

Existence d'un seuil photoélectrique : conditions d'obtention du phénomène.

- Quels sont les trois cas envisageables lorsqu'un électron absorbe un photon ?
1. L'énergie du photon est égale au travail de sortie de l'électron $\Leftrightarrow h \cdot \nu = W_s$ (voir diagramme précédent). L'énergie du photon suffit tout juste à expulser l'électron hors du métal. La fréquence correspond alors la fréquence de seuil du métal : $\nu = \nu_s = \frac{W_s}{h}$.
 2. L'énergie du photon est inférieure au travail de sortie $\Leftrightarrow h \cdot \nu < W_s \Leftrightarrow \nu < \nu_s$. L'électron capte une énergie $h \cdot \nu$ insuffisante pour sortir du métal : il reste prisonnier du réseau métallique, il n'absorbe pas d'énergie.
 3. L'énergie du photon est supérieure au travail de sortie $\Leftrightarrow h \cdot \nu > W_s \Leftrightarrow \nu > \nu_s$. L'électron capte l'énergie $h \cdot \nu$. Une partie, W_s de cette énergie sert à libérer l'électron du réseau métallique ; l'électron conserve l'excédent sous forme d'énergie cinétique E_c :

$$E = h \cdot \nu = E_c + W_s \Leftrightarrow E_c = h \cdot \nu - W_s = h \cdot \nu - h \cdot \nu_s = h \cdot (\nu - \nu_s)$$

Retour sur l'expérience de Hertz :

- Calculer la fréquence de seuil du métal zinc pour en extraire un électron sachant que l'énergie nécessaire pour libérer un électron d'un atome de zinc et le transformer en ion zinc Zn^+ est 9,394 eV (cette énergie est appelée énergie de première ionisation).

L'énergie minimale nécessaire pour extraire un électron est :

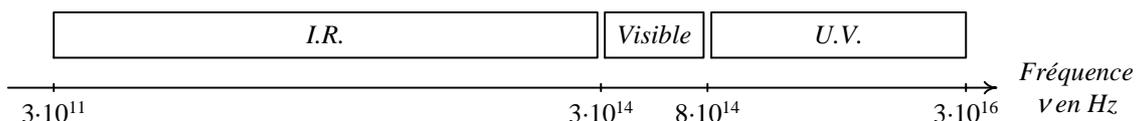
$$W_s = 9,394 \text{ eV} = (9,394 \times 1,602 \cdot 10^{-19}) \text{ J} = 1,505 \cdot 10^{-18} \text{ J}.$$

Cette énergie doit être apportée par un photon de même énergie donc $W_s = E = h \cdot \nu_s$.

$$\text{La fréquence } \nu_s \text{ du photon doit donc être de } \nu_s = \frac{E}{h} = \frac{1,505 \cdot 10^{-18}}{6,626 \cdot 10^{-34}} = 2,271 \cdot 10^{15} \text{ Hz}.$$



- A quel type de rayonnement cette fréquence correspond-elle ?



$2,271 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$ est la fréquence seuil, minimale : il faut donc éclairer la plaque de zinc avec un rayonnement *U.V.* pour extraire des électrons.

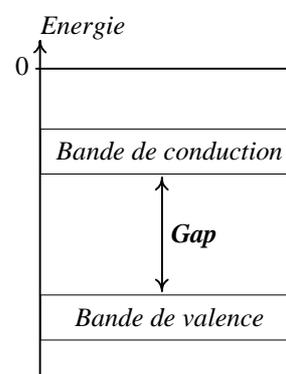
- Est-ce en accord avec l'expérience de Hertz ? **Oui.**

1.1.6. Application de l'effet photoélectrique

Le soleil est une source d'énergie inépuisable, l'exploitation de son rayonnement pour produire de l'électricité a été possible par la compréhension de l'effet photoélectrique : un panneau photovoltaïque convertit une partie de l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrique.

Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour la fabrication de panneaux photovoltaïques. Il fait partie de la famille des matériaux semi-conducteurs dont le diagramme d'énergie des électrons est du type schématisé ci-contre.

En effet, en physique du solide, les bandes de valence et de conduction modélisent des valeurs d'énergie que peuvent prendre les électrons d'un semi-conducteur à l'intérieur de celui-ci. De façon générale, ces électrons n'ont la possibilité de prendre que des valeurs d'énergie comprises dans certains intervalles, lesquels sont séparés par des "bandes" d'énergie interdites. Cette modélisation conduit à parler de **bandes d'énergie**.



La *bande de valence* est la dernière bande de basse énergie contenant des électrons.

La *bande de conduction* est la première bande de haute énergie vide d'électrons.

Pour le silicium, l'énergie nécessaire (*Gap*) pour faire passer un électron de la bande de valence à la bande de conduction est de $1,12 \text{ eV}$.

- Calculer la fréquence minimale du rayonnement permettant de faire passer un électron de la bande de valence à la bande de conduction.

$$\nu = \frac{E}{h} = \frac{1,12 \times 1,602 \cdot 10^{-19}}{6,626 \cdot 10^{-34}} = 2,71 \cdot 10^{14} \text{ Hz} .$$

- A quels rayonnements les panneaux photovoltaïques en silicium sont-ils sensibles ?

Donc les rayonnements visibles et *U.V.* ont une énergie suffisante pour libérer des électrons du silicium.

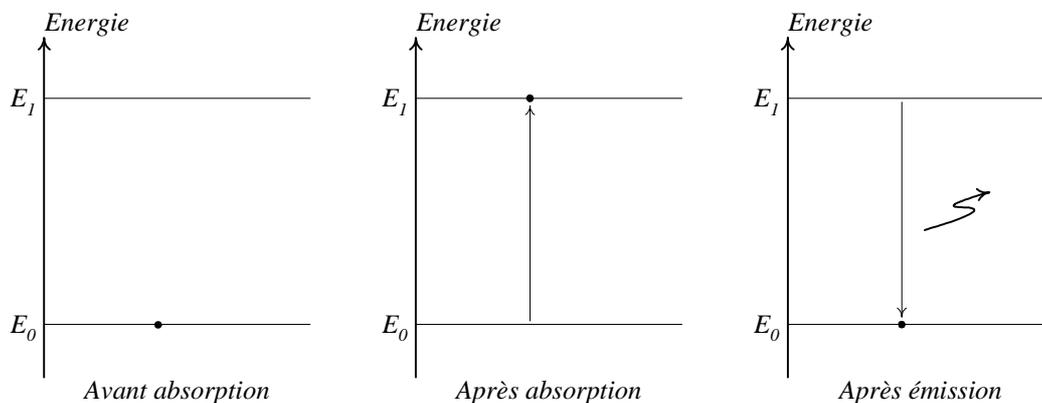
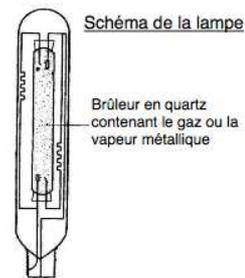
L'effet photovoltaïque illustre l'interaction de photons avec la lumière ce qui entraîne l'émission d'électrons. Nous allons maintenant étudier l'interaction d'électrons avec la matière.



1.2. Lampe à décharge de sodium

Ces types de lampe produisent de la lumière grâce à une décharge électrique dans un gaz, ici de la vapeur de sodium.

- Commenter chacun de ces trois diagrammes d'énergie afin d'expliquer l'émission de lumière par une lampe à décharge de sodium.



Avant absorption, les électrons du sodium sont dans leur état fondamental, stable E_0 .

Après un choc avec un électron émis par une cathode à l'extrémité du tube, les électrons des atomes de sodium absorbent de l'énergie et se retrouvent dans un niveau d'excitation peu stable E_1 .

C'est en retombant dans un état plus stable que de l'énergie est émise sous forme de rayonnement lumineux dont la longueur d'onde dépend de la variation d'énergie.

- Sachant que l'énergie de l'état fondamental est $E_1 = -5,14 \text{ eV}$ et que l'énergie du premier état excité est $E_2 = -3,03 \text{ eV}$, calculer la longueur d'onde de la radiation émise.

$$E_1 - E_0 = \frac{h \cdot c}{\lambda} \Leftrightarrow \lambda = \frac{h \cdot c}{E_1 - E_0} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \times 3,00 \cdot 10^8}{(-3,03 + 5,14) \times 1,602 \cdot 10^{-19}} = 589 \text{ nm}.$$

- A quel domaine de rayonnement appartient cette radiation ?

Rayonnement visible, lumière orangée.

2. La fluorescence

2.1. Cas général

Lorsque de la lumière incidente d'énergie E_{inc} arrive sur une matière fluorescente, une partie de cette énergie est gardée par la matière. Le reste, E_{em} , est réémis sous forme d'un rayonnement, le tout dans un bref intervalle de temps.

- Laquelle de ces deux énergies (E_{inc} ou E_{em}) est la plus grande ?

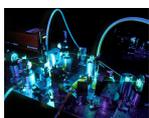
Une partie de l'énergie est gardée par la molécule, donc $E_{em} < E_{inc}$.

- Comparer les longueurs d'onde des radiations absorbées λ_{inc} et émises λ_{em} .

On a $E_{em} = \frac{h \cdot c}{\lambda_{em}}$ et $E_{inc} = \frac{h \cdot c}{\lambda_{inc}}$. Or $E_{em} < E_{inc}$, donc $\frac{h \cdot c}{\lambda_{em}} < \frac{h \cdot c}{\lambda_{inc}} \Rightarrow \frac{1}{\lambda_{em}} < \frac{1}{\lambda_{inc}} \Rightarrow \lambda_{em} > \lambda_{inc}$.

- Quelle est alors la particularité de la fluorescence ?

Une absorption dans une couleur pourra conduire à l'émission d'une autre couleur de longueur d'onde plus grande.



2.2. Cas d'un agent azurant

Un agent azurant est une molécule qui absorbe les rayonnements électromagnétiques ultraviolets entre 300 et 400 nm de longueur d'onde et réémet ensuite cette énergie par fluorescence dans le visible entre 400 et 500 nm.

Le premier agent azurant à être utilisé industriellement a été le méthylumbelliféron.

Lorsque l'on éclaire le méthylumbelliféron avec une radiation ultraviolette à $\lambda_{inc} = 340 \text{ nm}$.

La molécule garde une énergie de 0,764 eV puis réémet une radiation de longueur d'onde λ_{em} .

- Déterminer λ_{em} . A quel type de rayonnement correspond cette longueur d'onde ?

$$\text{On a } E_{inc} = \frac{h \cdot c}{\lambda_{inc}} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \times 3,00 \cdot 10^8}{340 \cdot 10^{-9}} = 5,85 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 3,65 \text{ eV} .$$

$$\text{Or, } E_{em} = E_{inc} - 0,764 = 3,65 - 0,764 = 2,89 \text{ eV} , \text{ ainsi comme } E_{em} = \frac{h \cdot c}{\lambda_{em}} \text{ et } \lambda_{em} = \frac{h \cdot c}{E_{em}} , \text{ on}$$

$$\text{obtient } \lambda_{em} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \times 3,00 \cdot 10^8}{2,89 \times 1,602 \cdot 10^{-19}} = 429 \text{ nm} .$$

Cette longueur d'onde correspond à une radiation visible de couleur bleue.

Certaines fibres naturelles telles la cellulose ont tendance à absorber dans le bleu et ont par conséquent un aspect jaunâtre.

- Pourquoi l'utilisation d'un agent azurant comme le méthylumbelliféron dans une lessive permet-elle de donner au linge un « éclat de blancheur ».

Un agent azurant peut être ajouté à une lessive afin de compléter la gamme de lumière visible. En effet, la couleur blanche vue par l'œil humain est une combinaison de toutes les longueurs d'onde du visible.

2.3. Applications

- ✓ poudres fluorescentes utilisées dans les tubes fluorescents pour donner le fond continu au spectre de raies ;
- ✓ jouets pour enfants ;
- ✓ aiguilles de montre.

Données :

- Constante de Planck : $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$;
- $1,0 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.