

Fiche professeur

Thème du programme : Observer	Sous-thème : sources de lumière colorée
-------------------------------	---

Modèle corpusculaire de la lumière : le photon

Type d'activité : Activité documentaire

Conditions de mise en œuvre :

Prévoir éventuellement un électroscope pour en expliquer le fonctionnement.

Une introduction par l'histoire, l'analyse d'une expérience puis celle d'applications technologiques constituent un fil directeur de cette ouverture au monde quantique.

Il est souhaitable que l'activité soit proposée à préparer par les élèves avant d'être retravaillée en classe entière, électroscope à l'appui, ou après que ce dernier ait été montré (si la partie champs et force a déjà été traitée, par exemple).

Cette activité ne traite pas des diagrammes énergétiques à proprement parler.

Durée : 1 heure (l'une des applications peut être préférée selon la rapidité du groupe classe) – cette durée semble raisonnable car l'activité donne des éléments de cours directs.

- Pré-requis :
- Distinguer une source polychromatique d'une source monochromatique caractérisée par une longueur d'onde dans le vide.
 - Connaître les limites en longueur d'onde dans le vide du domaine visible et situer les rayonnements infrarouges et ultraviolets.
 - Savoir qu'une énergie s'exprime généralement en joules (classe de Seconde)

NOTIONS ET CONTENUS	COMPETENCES ATTENDUES
Modèle corpusculaire de la lumière : le photon. Energie d'un photon.	Interpréter les échanges d'énergie entre lumière et matière à l'aide du modèle corpusculaire de la lumière. Connaître les relations $\lambda = c/v$ et $E = h v$

Compétences transversales : (préambule du programme et socle commun)

- mobiliser ses connaissances
- rechercher, extraire, organiser des informations utiles
- formuler des hypothèses
- raisonner, argumenter, démontrer
- développer une culture scientifique et technique

Mots clés de recherche : **quantification, lumière, modèle, photon, corpusculaire**

Provenance : Académie d'Orléans-Tours

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

« Plus on s'approche de la lumière, plus on se connaît plein d'ombres »
Christian Bobin, *La plus que vive*, Gallimard (1999).

La lumière : onde ou particule ? Une longue histoire

Dans l'Antiquité déjà, la question se posait : qu'est-ce que la lumière ? Objet impalpable, mystérieux, substance unique qui transmet les mouvements à l'âme pour Platon... Beaucoup de pistes sont explorées. Le recours à la géométrie est même utilisé, avec les atomistes (Empédocle, Euclide) quelques siècles avant notre ère notamment, et une optique géométrique est développée par Ptolémée (II^{ème} siècle ap. J.-C.) puis par les savants du monde arabe tels que le perse Alhazen (X^{ème} siècle). En Occident, le Moyen-Âge est une période très calme du point de vue des développements scientifiques.

Dès le XVII^{ème} siècle, avec l'essor de l'optique expérimentale, et pendant plus de trois siècles, la nature de la lumière fut au cœur des débats scientifiques : deux théories – dont chacune se fondait sur des résultats empiriques – se développèrent et s'affrontèrent.

Une théorie **corpusculaire** sera défendue par Isaac Newton (1643-1727), fort de ses succès en mécanique, pour qui la lumière est composée de particules dont les masses différentes provoquent sur notre rétine des sensations distinctes : les couleurs. La propagation rectiligne de la lumière et la réflexion découlent tout logiquement de ce concept. Quant à la réfraction, son explication est plus délicate : elle fait appel à la masse des particules et à une action attractive qu'exerce un corps transparent sur les corpuscules de lumière qui le traversent. L'autorité de Newton imposera cette conception bien longtemps encore après sa mort.

Un groupe d'hommes, au cours de ces deux siècles, prendra le parti d'une théorie **ondulatoire**. Ils ont un point commun : une liberté d'esprit indispensable pour affronter le prestige du grand Newton. Le premier, le Néerlandais Christian Huygens (1629-1695), imagine la lumière comme une vibration se transmettant de proche en proche dans un milieu immatériel : l'éther. Cette approche lui permet notamment de rendre compte de la diffraction. Plus tard, Thomas Young et Augustin Fresnel apportèrent leurs contributions : le premier en découvrant, en 1801, un phénomène interférentiel inédit et en mesurant les longueurs d'onde de la lumière ; le second en découvrant, en 1819, la nature transversale des ondes lumineuses et, grâce à celle-ci, en expliquant de façon convaincante tous les phénomènes de polarisation.

Un pas décisif est accompli en 1849, lorsqu'Hippolyte Fizeau, puis quelques temps plus tard Léon Foucault, mesurent la vitesse de la lumière dans l'eau et montrent qu'elle est plus faible que dans l'air. C'était la vérification d'une prédiction de la théorie ondulatoire, alors que la théorie corpusculaire affirmait exactement le contraire. La cause était entendue, la théorie ondulatoire triomphait.

James Clark Maxwell précisera la nature électromagnétique de cette onde en 1865 puis en 1873 : cela faisait de la lumière un membre parmi d'autres de la grande famille des ondes électromagnétiques. C'était alors l'âge d'or de la mécanique « classique »...

A la fin du XIX^{ème} siècle, le monde du tout petit commence à se dévoiler : Thomson découvre l'électron en 1897 et toutes les recherches se concentrent sur la constitution de la matière. Etant donné leur taille et leur comportement, les particules, les électrons, l'atome, les molécules ne sont pas des objets « observables » : pour les étudier, on analyse leur rayonnement électromagnétique, ou plus exactement l'interaction entre ce rayonnement et la matière.

Questions

1. Réfraction, diffraction, polarisation, interférences... Décrire en une phrase rapide ces quatre phénomènes lumineux, si besoin après une rapide recherche documentaire.
2. Quels sont les deux modèles de la lumière qui se sont fait face dans l'Histoire ?
3. A l'aube du XX^{ème} siècle, quelle est la théorie qui prévaut ?

L'effet photoélectrique

Dans la deuxième moitié du XIX^{ème} siècle, comme beaucoup de ses collègues, l'ingénieur allemand Heinrich Rudolf Hertz consacre l'essentiel de ses recherches au domaine porteur de l'électromagnétisme. En 1886, il fait une observation troublante.

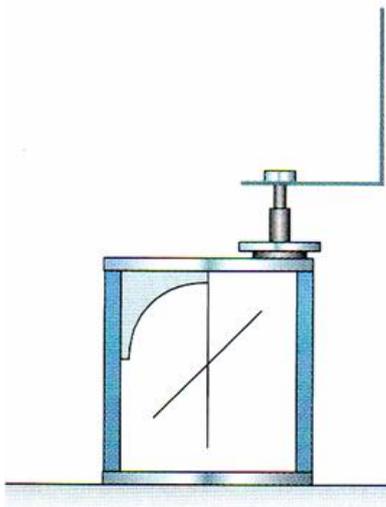


Fig. 1 : Electroscopie initialement chargé négativement : on utilise une baguette de PVC frottée sur de la laine. Une fois chargé, les feuilles de l'électroscope s'écartent l'une de l'autre.

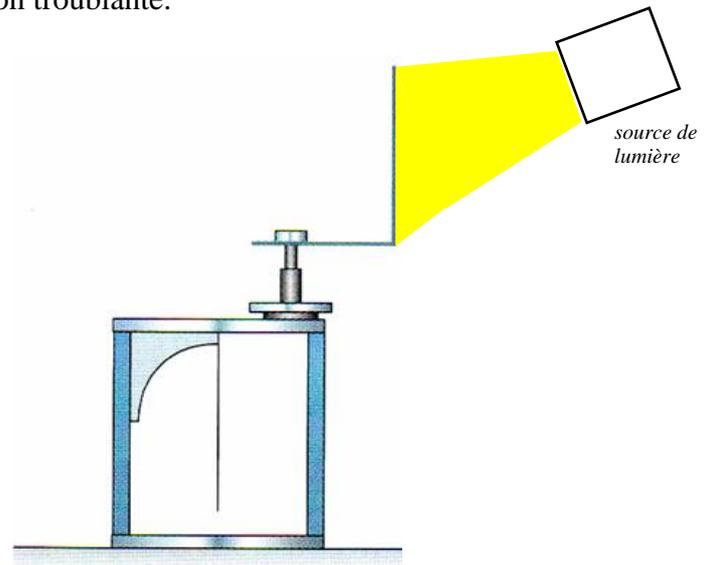


Fig. 2 : Si la lame est éclairée « correctement », les feuilles de l'électroscope se rapprochent.

Remarque : un électroscope est constitué d'un plateau relié par un conducteur à deux feuilles conductrices de masse très faible (feuilles d'or ou de PET métallisé). Une boîte métallique avec des fenêtres vitrées (pour l'observation des feuilles) sert d'écran électrostatique et protège les feuilles des courants d'air.

Quand les feuilles sont chargées, elles portent des charges de même signe qui se repoussent et les feuilles s'écartent¹. La déviation est d'autant plus importante que la charge est grande.

Questions

1. Pourquoi les feuilles de l'électroscope s'écartent-elles tout d'abord (Fig. 1) ?
2. Comment interpréter le fait qu'elles se rapprochent (Fig. 2) ?
3. Que se passe-t-il, d'après vous, si l'électroscope était initialement chargé positivement (baguette d'ébonite frottée sur sac plastique) ?
4. Pour quelle autre découverte Heinrich Hertz est-il resté célèbre ? Qu'appelle-t-on ondes *hertziennes* ? Que décrit l'unité qui porte aujourd'hui son nom ?

En 1900, le physicien allemand Lenard montra que seules les radiations *de faible longueur d'onde* peuvent provoquer la *photoémission*, quelle que soit l'intensité du rayonnement incident.

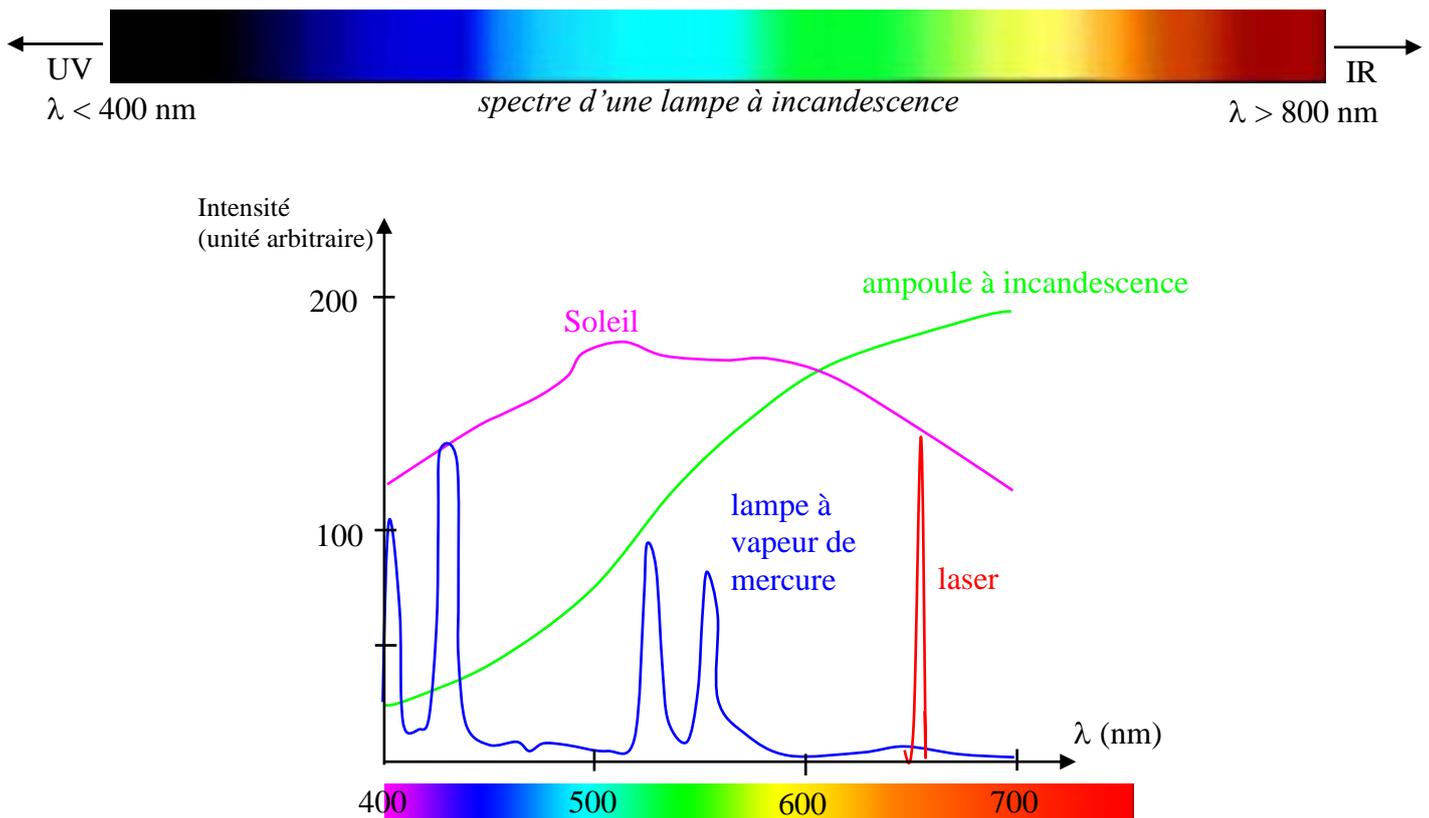
5. Associer les concepts suivants en les reliant.

longueur d'onde de la lumière •
intensité de la lumière •

• éblouissement produit
• couleur de la lumière

¹ Une animation : <http://subaru2.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/electri/electrometre.html>

On donne la répartition spectrale de l'intensité de sources lumineuses diverses dans le domaine visible, au laboratoire.



L'inflammation d'un ruban de magnésium ou l'éclairement par une lampe à vapeur de mercure² provoquent le rapprochement des lames de l'électroscope ; ce n'est pas le cas d'une lampe à incandescence ou de la lumière d'un laser.

1. Parmi les quatre proposées, identifier une source lumineuse à spectre continu et une source lumineuse à spectre de raies (ou bandes).
2. Qu'entend Lenard par « radiations de courte longueur d'onde » ? Dans quel domaine des spectres précédents se situent ces radiations ?
3. D'après vous, pourquoi le magnésium enflammé ou encore la lampe à vapeur de mercure modifient-elles l'état de l'électroscope ?

Hertz interpose également une plaque de verre entre la source lumineuse et le zinc : l'électroscope ne se décharge alors plus en utilisant la lumière du magnésium ou de la lampe à vapeur de mercure.

4. Comment peut-on interpréter l'action de la lame de verre ? Quelles sont visiblement les radiations qui provoquent l'effet photoélectrique constaté par Hertz ?

Indice : même près d'une fenêtre, qu'il est difficile de bronzer dans une salle de classe...

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

² Les lampes à économie d'énergie sont des ampoules de gaz contenant, entre autres, du mercure : la toxicité de ce métal impose de recycler ces lampes correctement.

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 joules³, 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.

Questions

1. Associer en reliant :

- | | |
|---------------------------------|----------------------------|
| longueur d'onde de la lumière • | • énergie du photon |
| intensité de la lumière • | • nombre (flux) de photons |

2. Exprimer l'énergie d'un photon en fonction de la longueur d'onde de l'onde lumineuse associée.

3. Vrai ou faux ?

- Les photons les plus énergétiques correspondent à une onde de fréquence élevée
- Les photons les plus énergétiques correspondent à une onde de longueur d'onde élevée
- Les photons UV sont plus énergétiques que les photons IR

4. Quelle est l'énergie minimale d'un photon susceptible de provoquer un effet photoélectrique sur la plaque de zinc ?

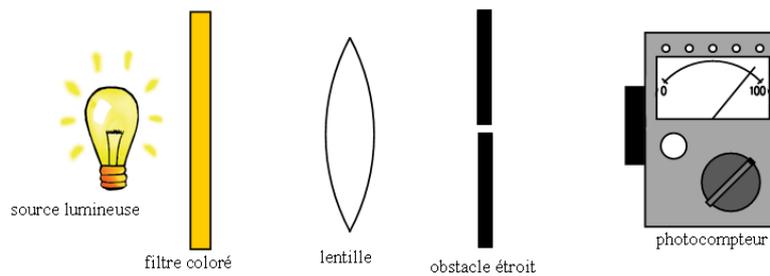
Cohabitation des modèles de la lumière

Plusieurs approches des phénomènes lumineux sont possibles : il faut choisir la description la plus adaptée aux conditions expérimentales.

Le modèle géométrique, que l'on aborde en 1^{ère}, permet de prévoir de manière simple le cheminement de la lumière lors de la traversée d'un système optique même complexe. Le concept de rayon de lumière est pertinent si la taille des ouvertures est grande devant la longueur d'onde et si l'énergie lumineuse est suffisante pour qu'il y ait un grand nombre de corpuscules de lumière (photons) présents.

³ Les énergies mises en jeu justifient l'utilisation de l'électron-volt : $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19}$ J

Le modèle ondulatoire est beaucoup plus puissant et plus large que l'optique géométrique. Outre la formation des images, cette approche explique correctement les interférences, la diffraction par de très petites ouvertures ou encore la polarisation de la lumière. L'approche ondulatoire atteint ses limites lors de faibles échanges énergétiques lumière-matière. Le modèle corpusculaire doit alors être introduit pour expliquer l'effet photoélectrique ou la détection de photon unique.



De la lumière blanche à la lumière monochromatique, traitée par la lentille (optique géométrique), subissant une diffraction (optique ondulatoire) et rencontrant un photomultiplicateur compteur de photons (optique corpusculaire)...

Le modèle le plus élaboré aujourd'hui est l'électrodynamique quantique, qui explique tous les phénomènes d'émission, de propagation et d'interaction de la lumière avec la matière. Le photon γ est *le boson intermédiaire de l'interaction électromagnétique*.

Questions

1. Ce modèle qui contient (quelque part) à lui seul toute la science optique vous semble-t-il indispensable pour étudier la formation des images à travers une paire de jumelles ou un télescope ?
2. Dans un autre registre, tout l'édifice de la science mécanique repose sur les forces d'interactions interatomiques. Qu'en pensez-vous ?

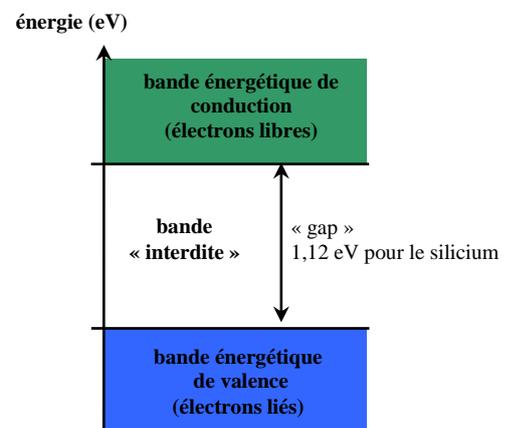
Application n°1 : Les panneaux solaires (cellules photovoltaïques)

Des matériaux semi-conducteurs

Un semi-conducteur est un matériau qui a les caractéristiques électriques d'un isolant, mais pour lequel la probabilité qu'un électron puisse contribuer à un courant électrique, quoique faible, est suffisamment importante. En d'autres termes, la conductivité électrique d'un semi-conducteur est intermédiaire entre celle des métaux et des isolants à proprement parler.

Dans l'obscurité, un cristal ordinaire de semi-conducteur présente une résistivité élevée. Lorsqu'il est fortement éclairé par un rayonnement de fréquence assez élevée (lumière visible ou UV), sa résistivité diminue : c'est le phénomène de **photoconductivité**.

Dans un matériau semi-conducteur, pour qu'un électron lié à son atome et participant aux liaisons chimiques (bande de valence), devienne libre et mobile (bande de conduction) dans un éventuel champ électrique, il faut entre autres conditions, lui transférer une énergie minimale, par exemple par absorption de photons ou par élévation de la température.

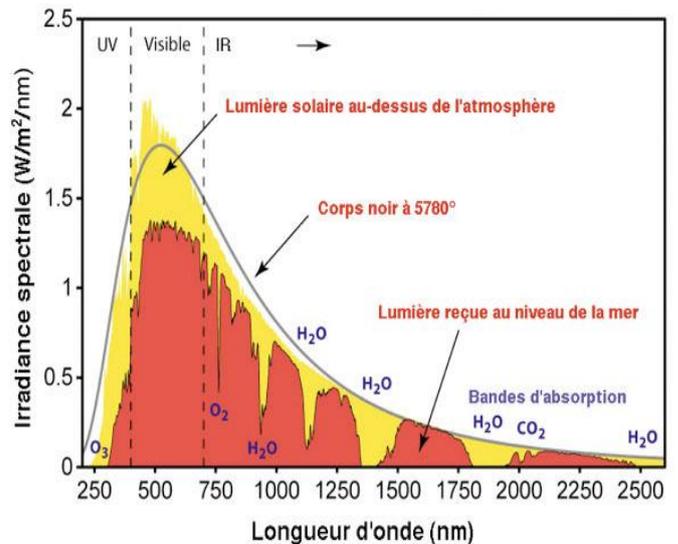


Tous les photons du spectre solaire peuvent être absorbés par les électrons, mais tous ne donnent pas lieu à une promotion d'électrons vers la bande de conduction. Nous l'avons vu, les photons qui constituent la lumière sont des grains d'énergie d'autant plus élevée que la fréquence de l'onde correspondant à cette lumière est grande ; si la fréquence du rayonnement est grande – donc l'énergie du photon suffisante –, ce photon pourra aider un électron bloqué dans la bande de valence à sauter dans la bande de conduction.

Pour le silicium cristallin (voir diagramme ci-dessus), la largeur de la *bande interdite* (ou *gap*, entre la bande de valence et la bande de conduction), 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 électron-volt. C'est la prolifération d'électrons "libres" dans la bande de conduction (et des "trous" qu'ils laissent), qui rend le matériau plus conducteur.

Questions

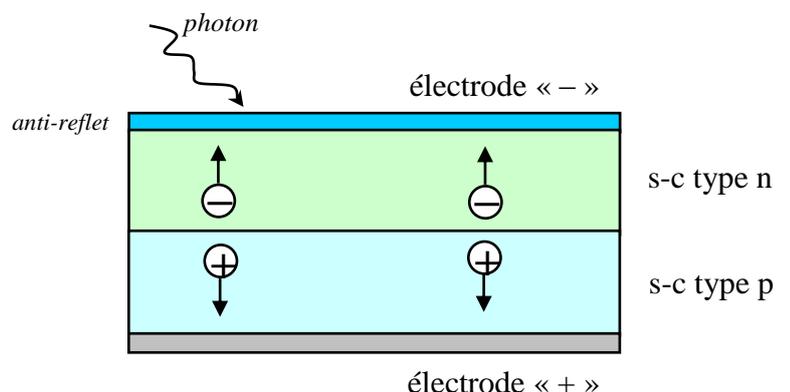
1. Calculer la fréquence minimum du rayonnement dont le photon de base possèdera une énergie suffisante pour faire passer un électron de la bande de valence à celle de conduction pour le silicium cristallin.
2. A quel domaine du spectre électromagnétique ce rayonnement appartient-il ? Justifier l'utilisation de ce semi-conducteur dans la fabrication des panneaux solaires, à la lumière du graphique⁴ ci-dessous.



De la diode PN à la cellule photovoltaïque

Lorsqu'un matériau semi-conducteur riche en électrons (on dit dopé de type n) est mis en contact intime avec un autre matériau semi-conducteur pauvre en électrons (on dit dopé de type p), la « jonction PN » entre les deux milieux va être le lieu d'un bouleversement. Dans cette zone étroite, les électrons en excès dans la partie n diffusent dans la partie p. Ainsi, dans la zone n, il se crée près de la jonction une région chargée positivement, dans le sens où il y manque des électrons.

Symétriquement, dans la zone p, il se crée une région chargée négativement, i.e. où il y a excès d'électrons. A l'équilibre, entre ces deux zones chargées positivement et négativement (dans ce qu'on appelle la zone de déplétion ou zone de charge d'espace), il s'est donc créé un champ électrique dirigé de la région p à la région n, et une différence de potentiel V_d apparaît. Ce champ électrique est fondamental pour le fonctionnement des cellules solaires.



⁴ Image tirée de Wikipedia : http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_radiation

Seules les paires « électron-trou » générées près de la zone de déplétion ou en son sein pourront être séparées par l'intense champ électrique qui y règne et produire un courant électrique qu'il faut collecter en réalisant des contacts avant et arrière. Ce courant *photovoltaïque* est directement proportionnel à l'intensité de l'éclairement et est dirigé de la région n à la région p.

Remarque sur la couleur des panneaux solaires :

Une tranche de silicium réfléchit près de 40 % du rayonnement. En réalisant sur la face avant des couches anti-reflets dont la transmission optique est optimisée pour le domaine de longueurs d'onde d'intensité maximale du spectre solaire, la surface traitée ne réfléchit plus que 4% du rayonnement. Ce sont ces couches anti-reflets qui donnent aux cellules solaires leur couleur bleue, alors que le silicium est naturellement gris. Par variation de l'épaisseur de ces couches, on obtient également des cellules solaires de différentes couleurs, mais toujours au prix d'une perte de puissance.



D'autres matériaux peuvent être utilisés – mais le silicium représente 90 % du marché. Sous forme cristalline, il est plus cher mais offre un rendement optimal ; sous forme amorphe, il forme des panneaux très fins (comme la plupart des autres semi-conducteurs utilisés).

Matériau	Si amorphe	CdTe	GaAs	Si cristallin	CIS
E_g	1,7 eV	1,45 eV	1,42 eV	1,12 eV	1,00 eV
λ_{max} (nm)					

Questions

1. Exprimer la longueur d'onde maximale λ_{max} au-delà de laquelle la conversion photovoltaïque ne peut plus avoir lieu en fonction de la constante de Planck h , de la célérité de la lumière dans le vide c et de la charge élémentaire e .
2. Compléter le tableau.
3. D'après vous, pour quelle raison le silicium représente-t-il 90 % du marché ?

Application n°2 : Le photomultiplicateur

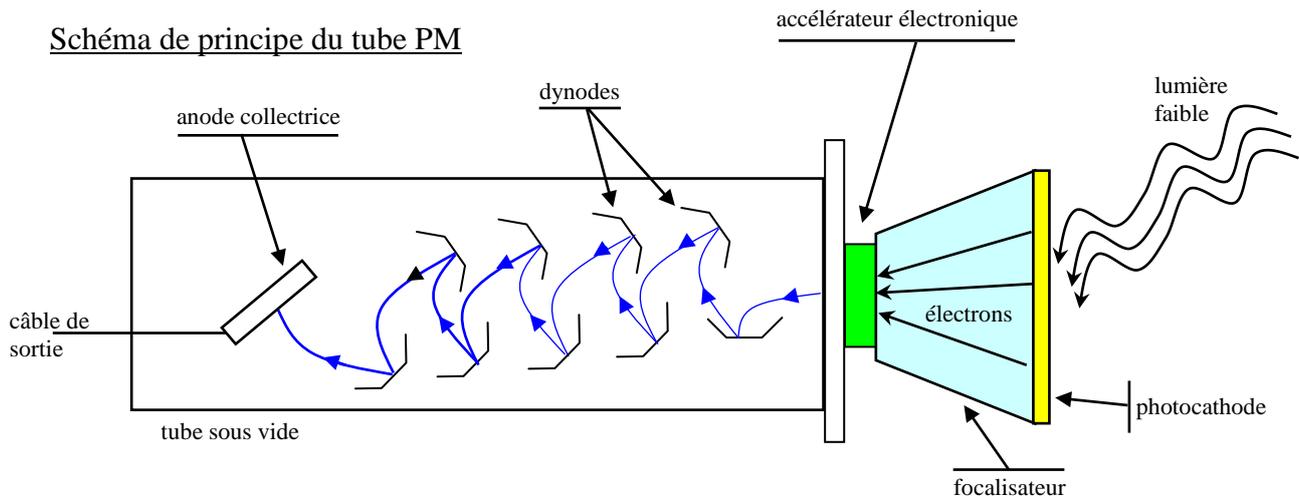
Le photomultiplicateur est un dispositif permettant la détection de photons. Il se présente sous la forme d'un composant électronique tubulaire d'une dizaine de centimètres de long. Sous l'action de la lumière, des électrons sont arrachés, par effet photoélectrique, à une photocathode métallique, le faible courant électrique ainsi généré est amplifié par une série de dynodes utilisant le phénomène d'émission secondaire pour obtenir un gain important. Ce détecteur permet de compter les photons individuellement. Il est généralement sensible de l'ultraviolet à l'infrarouge proche, avec des temps de réponse de l'ordre de la nanoseconde (soit 10^{-9} seconde).



PM 1P128
à 9 étages (dynodes)

Le tube PM (pour PhotoMultipliateur) est utilisé dans la vidéosurveillance civile et militaire dans des conditions de luminosité réduite, tout autant que dans l'astronomie⁵, couplé à un amplificateur et à un discriminateur.

Schéma de principe du tube PM



Questions

1. Quel est l'organe de ce dispositif susceptible de subir un effet photoélectrique ?

Afin d'éjecter un électron d'une structure, un photon doit être absorbé par un électron et lui fournir une énergie E_{ph} supérieure au travail d'extraction ϕ du matériau.

Matériau	sodium	argent	silicium	carbone	or
Travail d'extraction	2,7 eV	4,3 eV	4,8 eV	5,0 eV	5,1 eV

2. Quelle est la longueur d'onde d'une radiation lumineuse susceptible d'arracher un électron d'une plaque de silicium ?
3. Dans quel domaine de longueur d'onde se situe cette radiation ?
4. L'ensemble de dynodes constitue ce qu'on appelle un électromultiplicateur : quel est son rôle ?

Un laser hélium-néon émet un faisceau de lumière de puissance $P = 0,10$ Watt dont la longueur d'onde est égale à $\lambda_0 = 633$ nm.

5. Déterminer le nombre de photons émis par le laser à chaque minute.

Rappel : $1 \text{ W} = 1 \text{ J.s}^{-1}$

6. Le photomultiplicateur est-il, d'après vous, adapté pour l'étude de cette source de lumière ?

⁵ Sur la photométrie en astronomie : <http://www.astrosurf.com/luxorion/photometrie.htm>

Ressources supplémentaires

L'histoire en images

- <http://www.synchrotron-soleil.fr/Presse/Videos/OndesPhotons>
- http://www.dailymotion.com/video/xbwdtl_histoire-de-la-lumiere-ondes-et-pho_tech

Animations

- <http://benhur.telug.ugam.ca/~mcouture/photoElec/photoElec.htm>
- <http://subaru2.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/divers/photoelec.html>
- http://www.walter-fendt.de/ph14f/photoeffect_f.htm

Bibliographie on the web

- Mémoire original d'Eugène Bloch sur les travaux de Hertz (mai 1910) : http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/24/24/04/PDF/ajp-radium_1910_7_5_125_0.pdf
- J.-C. Boudenot : L'effet photoélectrique, de la découverte à l'interprétation http://www.aaeisep.fr/documents/revue_signaux/100_effet-photo.pdf

Ouverture : le piège à photon

tiré de <http://www2.cnrs.fr/presse/communiqu/1049.htm>

Un photon est un grain élémentaire de lumière. Il n'est en général observable que lorsqu'il disparaît. L'œil, comme la plupart des récepteurs de lumière, absorbe irréversiblement les photons qu'il détecte et l'information que porte la lumière est détruite à mesure qu'elle est enregistrée. On peut certes voir le même objet (macroscopique) aussi souvent que l'on veut, mais ce sont à chaque fois de nouveaux photons qui véhiculent son image vers notre œil.

Détruire les photons pour les mesurer n'est cependant pas une nécessité imposée par la nature. C'est ainsi que les chercheurs du laboratoire Kastler Brossel (CNRS/ENS/Collège de France/Université Paris 6) ont réussi à observer, des centaines de fois, un seul et même photon piégé dans une boîte. Après un temps qui peut atteindre une demi-seconde, le grain de lumière finit par s'échapper, de façon imprévisible et soudaine, réalisant un saut quantique. Les chercheurs ont suivi pour la première fois « en direct » l'histoire de la vie et de la mort de photons individuels.

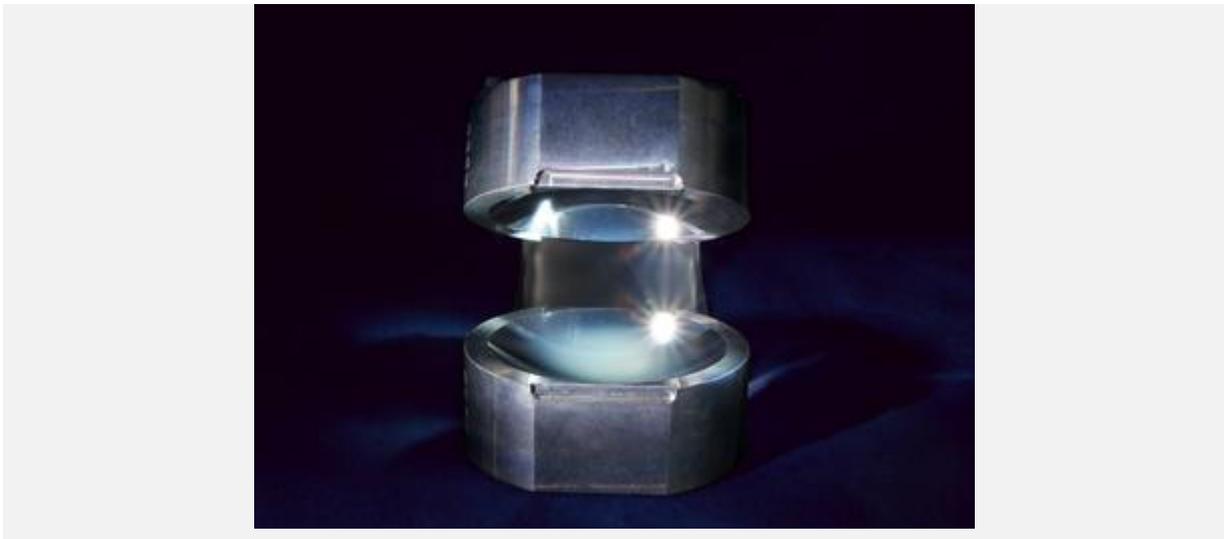
La clé de cette expérience est une « boîte à photons » : c'est une cavité formée de deux miroirs supraconducteurs refroidis à une température proche du zéro absolu. Entre les miroirs, qui se font face à 2,7 centimètres de distance, un photon issu du rayonnement thermique résiduel rebondit plus d'un milliard de fois avant de disparaître (contre un million au maximum s'il s'agissait de miroirs pour des photons visibles). Il parcourt en moyenne un trajet équivalent à la circonférence de la Terre.

Habituellement, on détecte les photons par absorption atomique. Un atome peut exister dans divers états d'énergie et il peut absorber un photon en passant d'un état à un autre d'énergie supérieure. En mesurant la variation d'énergie d'atomes absorbeurs traversant la cavité, on pourrait savoir si elle contient un photon, mais on le détruirait et ne le verrait donc qu'une fois.

L'astuce des chercheurs a été de choisir des atomes dont la transition entre deux états 0 et 1 correspond à une énergie différente de celle des photons. La conservation de l'énergie interdit alors à l'atome d'absorber la lumière. En revanche, la présence du photon modifie légèrement la fréquence de la transition atomique (mesurée à l'aide d'un champ micro-onde auxiliaire à l'extérieur de la cavité). Au final, l'atome est porté dans l'état 1 si la cavité contient un photon, et reste dans l'état 0 si elle est vide, comme dans la méthode classique, mais l'énergie absorbée

par l'atome est empruntée au champ auxiliaire et non à celui de la cavité : le photon est encore là après avoir été vu, prêt à être mesuré à nouveau.

Les chercheurs ont enregistré de nombreuses séquences de plusieurs secondes pendant lesquelles des milliers d'atomes traversant la cavité un à un sont détectés soit dans l'état 0, soit dans l'état 1. Dans un signal typique, les atomes sont d'abord détectés dans l'état 0 : la cavité est vide. Soudain, les atomes apparaissent dans l'état 1 signalant qu'un photon a été piégé entre les miroirs. Ce photon provient du rayonnement thermique résiduel dans lequel baigne la cavité. En général, il reste piégé environ un dixième de seconde. Dans certaines séquences, le photon survit plus longtemps, jusqu'à une demi-seconde. Il disparaît ensuite aussi soudainement qu'il était apparu, laissant la cavité vide. Les moments où les photons apparaissent et disparaissent révèlent les sauts quantiques de la lumière qui se produisent au hasard. En observant de tels sauts pendant plusieurs heures, les chercheurs ont vérifié de façon directe les propriétés statistiques du rayonnement thermique établies il y a un siècle par Planck et Einstein. Dans cette expérience, l'information transportée par un quantum de lumière est transférée des centaines de fois à un système matériel sans se perdre. Le même photon contrôle l'état d'un grand nombre d'atomes, réalisant un pas important vers le traitement quantique de l'information.



© M. Brune - CNRS 2007 (cette image est disponible auprès de la photothèque du CNRS, 01 45 07 57 90, phototheque@cnrs-bellevue.fr)
Figure 1 – La « boîte à photon », dans laquelle les chercheurs ont enregistré la vie et la mort d'un photon unique est composée de deux miroirs supraconducteurs qui se font face à 2,7 centimètres de distance. Ils sont refroidis à une température proche du zéro absolu

Remarque : les chercheurs français sont particulièrement reconnus dans le domaine de l'optique quantique. En 2009, Serge Haroche a reçu la médaille d'or du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) pour ses travaux sur la boîte à photon ; son directeur de thèse n'est autre que Claude Cohen-Tannoudji, lui aussi médaille d'or du CNRS en 1996, et surtout prix Nobel de physique en 1997 pour ses travaux sur le refroidissement des atomes par laser. Tous ces travaux sont extrêmement porteurs : ils ouvrent, notamment, la voie de l'informatique quantique.