

Vu en 1^{re}

La lumière

Onde électromagnétique

- Célérité dans le vide et dans l'air :
 $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
- Sa fréquence et sa longueur d'onde sont liées par :
 $\lambda \text{ en m} \rightarrow \lambda = \frac{c}{\nu}$

$c \text{ en m}\cdot\text{s}^{-1}$
 $\nu \text{ en Hz}$

Photons

Quantum d'énergie de chaque photon :

$$\mathcal{E}_{\text{photon}} \text{ en J} \rightarrow \mathcal{E}_{\text{photon}} = h \times \nu$$

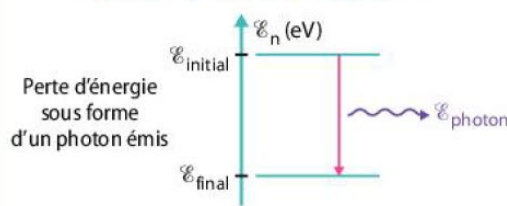
$h \text{ en J}\cdot\text{s}$
 $\nu \text{ en Hz}$

Le photon se déplace dans le vide à la célérité c .

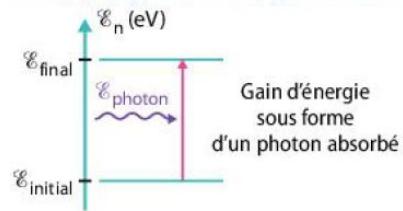
LUMIÈRE

Interaction lumière-matière

Émission de lumière par un atome



Absorption de lumière par un atome

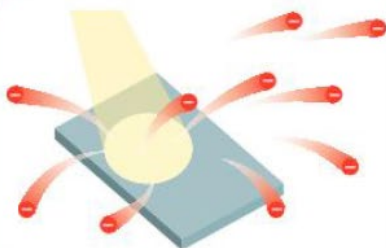


$$\Delta \mathcal{E} = |\mathcal{E}_{\text{final}} - \mathcal{E}_{\text{initial}}| = \mathcal{E}_{\text{photon}} = h \times \nu = h \times \frac{c}{\lambda}$$

A Heinrich HERTZ



B Effet photoélectrique

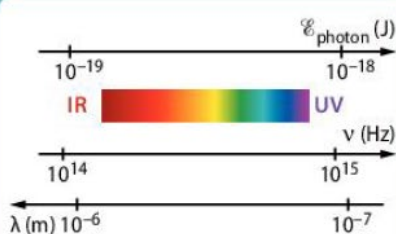


➤ Des électrons sont arrachés du métal sous l'effet d'une radiation lumineuse.

RAPPELS

- La lumière peut être décrite comme un flux de photons. Chaque photon possède une masse nulle et se propage à la célérité c de la lumière. Dans le vide, $c = 299\,792\,458\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Cette valeur est souvent arrondie à $3,00 \times 10^8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.
- Constante de Planck : $h = 6,63 \times 10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s}$.

C Spectre électromagnétique



➤ Un photon IR transporte moins d'énergie qu'un photon UV.

1 L'effet photoélectrique

a. Description de l'effet photoélectrique

• En 1887, Heinrich HERTZ (photographie A) réalise des expériences sur les ondes électromagnétiques de grande longueur d'onde, appelées depuis ondes hertziennes. Il remarque qu'un rayonnement ultraviolet favorise des décharges électriques, sous forme d'étincelles, au niveau des électrodes métalliques de son détecteur d'ondes hertziennes. S'il identifie la cause du phénomène observé, il ne sait pas l'interpréter.

• Par la suite, d'autres scientifiques étudient ces phénomènes :

– En 1888, Wilhem HALLWACHS constate qu'une plaque de zinc éclairée par de la lumière ultraviolette se charge positivement.

– Entre 1889 et 1895, Julius ELSTER et Hans GEITEL établissent un classement des métaux vis-à-vis de ce phénomène. Ils montrent notamment que pour les métaux alcalins, les lumières visible et ultraviolette permettent d'observer cet effet. Pour les autres métaux, l'effet n'est visible qu'avec de la lumière ultraviolette.

– En 1900, Philipp LENARD montre que des particules négatives sont arrachées d'une plaque métallique sous l'effet de la lumière. Ces particules négatives sont en fait des électrons (schéma B), découverts en 1897 par Joseph John THOMSON.

Le modèle ondulatoire de la lumière, qui était le modèle admis à l'époque, ne permet pas d'expliquer ces différentes observations.

• En 1905, Albert EINSTEIN postule que la lumière est constituée d'un ensemble de quanta d'énergie. Sa théorie lui permet, entre autres, d'expliquer les observations de P. LENARD. En 1916, son interprétation est validée par les expériences de Robert Andrew MILLIKAN. En 1926, Gilbert Newton LEWIS nomme « photons » les particules de lumière porteuses de ces quanta d'énergie.

L'effet photoélectrique est le phénomène d'éjection d'électrons d'un métal sous l'effet de radiations lumineuses. Pour un métal donné, cet effet ne se manifeste que pour des photons d'énergie suffisamment grande. L'effet est alors quasi instantané.

b. Énergie du photon

• L'énergie d'un photon est proportionnelle à la fréquence ν de l'onde lumineuse associée, et donc inversement proportionnelle à sa longueur d'onde λ (schéma C).

L'énergie d'un photon, notée $\mathcal{E}_{\text{photon}}$, est égale au produit de la constante de Planck h par la fréquence ν de la radiation associée à ce photon :

$$\mathcal{E}_{\text{photon}} \text{ en J} = h \text{ en J}\cdot\text{s} \times \nu \text{ en Hz ou s}^{-1} = \frac{h \times c}{\lambda} \text{ en m}\cdot\text{s}^{-1}$$

• Pour un métal donné, l'effet photoélectrique se produit lorsque la longueur d'onde de la radiation lumineuse mise en jeu est inférieure à une longueur d'onde seuil λ_s . La fréquence ν de cette radiation est alors supérieure à la fréquence seuil ν_s . L'énergie de chaque photon associé à cette radiation lumineuse est alors suffisante pour arracher un électron du métal : l'effet photoélectrique est observé.



Bilan énergétique de l'effet photoélectrique

VIDÉO DE COURS

c. Bilan énergétique et interprétation à l'aide du modèle particulaire

- Un **métal solide** est un édifice cristallin. Les atomes qui le constituent sont proches les uns des autres. Leurs électrons, en particulier les électrons périphériques, sont soumis à des interactions de la part de tous les noyaux environnants. Pour certains de ces électrons, les interactions avec les autres noyaux sont si fortes qu'ils sont libérés de leur atome initial : ce sont les **électrons libres** ou électrons de conduction.

- L'**énergie minimale** permettant d'arracher un électron d'un métal est égale au travail à fournir pour extraire un électron libre proche de la surface du métal. Elle est appelée **travail d'extraction**, $W_{\text{extraction}}$. Elle diffère d'un métal à un autre. Si l'énergie du photon est supérieure au travail d'extraction, l'excédent d'énergie est emporté par cet électron sous la forme d'**énergie cinétique**.

- L'arrachage d'autres électrons nécessite une plus grande énergie. Pour une même radiation lumineuse, l'énergie cinétique de l'électron arraché est alors plus faible. L'énergie cinétique d'un électron arraché est donc maximale pour un électron libre proche de la surface du métal.

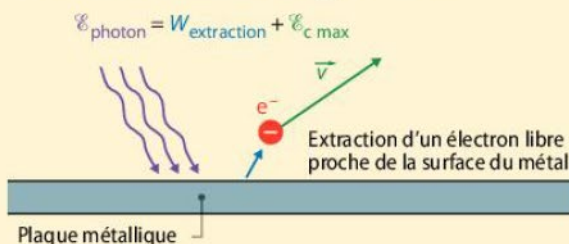
D Albert EINSTEIN



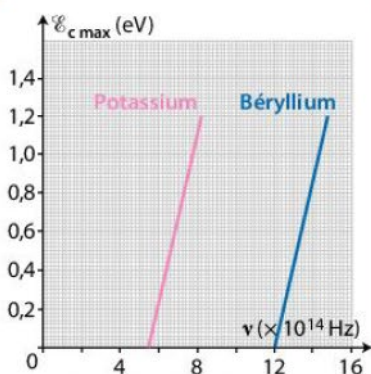
En 1905, Albert EINSTEIN reprend le modèle particulaire de la lumière proposé par Isaac NEWTON au XVII^e siècle et abandonné au XIX^e siècle au profit du modèle ondulatoire.

Lors de l'**effet photoélectrique**, l'énergie $\mathcal{E}_{\text{photon}}$ du photon incident est transférée à un électron pour l'extraire du réseau cristallin métallique ; le surplus d'énergie est emporté par l'électron sous forme d'énergie cinétique.

Si l'électron arraché est un électron libre proche de la surface du métal, la relation de **conservation de l'énergie** s'écrit :



E Énergie cinétique maximale des électrons



Lors de l'effet photoélectrique, l'énergie cinétique maximale $\mathcal{E}_{c \text{ max}}$ des électrons arrachés augmente avec la fréquence ν des photons incidents. Le coefficient directeur de chaque droite permet de retrouver la constante de Planck h .

$$\text{soit } h \times \nu_{\text{photon}} = W_{\text{extraction}} + \frac{1}{2} m_e \times v_{\text{max}}^2$$

h en $J \cdot s$ ν_{photon} en Hz ou s^{-1} $W_{\text{extraction}}$ en J m_e en kg v_{max} en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

Cette équation de conservation de l'énergie lors de l'effet photoélectrique est connue sous le nom d'« équation d'Einstein de l'effet photoélectrique » (photographie D). Elle explique chaque aspect de l'effet photoélectrique, notamment l'augmentation de l'énergie cinétique maximale des électrons arrachés en fonction de la fréquence du photon incident (courbe E).

- Si la lumière apportait progressivement l'énergie nécessaire pour arracher les électrons du métal comme le prévoit la théorie ondulatoire de la lumière, il suffirait d'éclairer le métal pendant une durée suffisante pour y parvenir. Or il n'en est rien : soit le phénomène a lieu quasi instantanément, soit il n'a pas lieu, car l'énergie apportée par le photon est insuffisante.

Le **modèle particulaire** de la lumière la décrit comme un flux de photons. Il permet d'expliquer l'effet photoélectrique, contrairement au modèle ondulatoire.

2 L'absorption ou l'émission de photons

a. Absorption de photons et cellule photoélectrique

Une **cellule photoélectrique**, ou photorécepteur, désigne tout dispositif dont une des propriétés électriques est modifiée lors de l'absorption de photons.

- La plupart des cellules photoélectriques font appel à des matériaux semi-conducteurs, dont les propriétés électriques sont intermédiaires entre celles d'un isolant et celles d'un conducteur métallique.
- L'absorption de photons engendre un signal électrique qui peut commander divers dispositifs comme l'allumage d'un éclairage.
- Parmi les cellules photoélectriques, on peut citer les **cellules photovoltaïques** (photographie F). Sous l'effet de la lumière, une tension électrique apparaît entre leurs faces : ce sont des générateurs. Elles convertissent l'énergie lumineuse en énergie électrique.

Le **rendement** η d'une cellule photovoltaïque est le rapport, sans unité, de la puissance ou l'énergie exploitable sur la puissance ou l'énergie en entrée :

$$\eta = \frac{\mathcal{P}_{\text{elec}}}{\mathcal{P}_{\text{lum}}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{elec}}}{\mathcal{E}_{\text{lum}}}$$

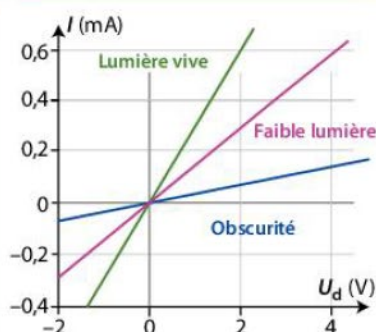
sans unité

F Panneaux solaires



Les panneaux solaires sont constitués de cellules photovoltaïques.

G Caractéristique intensité-tension d'une photorésistance



H Capteur CMOS



Un capteur CMOS, constitué de photodiodes, convertit un signal lumineux en signal électrique.

- Certains composants électriques sont aussi des cellules photoélectriques.

Exemples : Une **photorésistance** est un dipôle dont la résistance diminue d'autant plus que la lumière qu'elle reçoit est intense. Elle est donc sensible à toute variation de l'éclairage reçu (graphique G).

Une **photodiode** est un dipôle qui est traversé par un courant électrique d'intensité d'autant plus grande que la lumière qu'il reçoit est intense. Les photodiodes sont utilisées dans les capteurs CCD ou CMOS contenus dans les appareils photographiques ou les caméras (photographie H).

L'analyse des charges électriques accumulées dans les diverses zones du capteur permet de reconstruire l'image de l'objet photographié.

- La **spectroscopie** est une méthode d'analyse qui utilise des capteurs CCD ou CMOS. Le composé à analyser est éclairé par des radiations qui interagissent avec la matière. Les longueurs d'onde des radiations que le composé absorbe donnent des renseignements sur sa structure chimique (voir chapitre 2).

b. Émission de photons et diodes électroluminescentes (DEL)

- Une diode électroluminescente (DEL) est un dipôle dans lequel s'opère une conversion inverse de celle qui a lieu dans une photodiode. Le passage d'un courant électrique dans la structure semi-conductrice d'une DEL entraîne l'émission de photons. La fréquence de la lumière émise, et de ce fait la couleur de cette lumière, dépend de la nature du semi-conducteur.
- Une diode laser a la particularité d'émettre une radiation que l'on peut rendre plus directive que celle d'une DEL : l'énergie est alors concentrée dans une direction.



▶ VIDÉO DE COURS
 Bilan énergétique de l'effet photoélectrique
▶ QCM
 Version interactive

1 L'effet photoélectrique

décrit la lumière comme un flux de photons

Modèle particulaire de la lumière

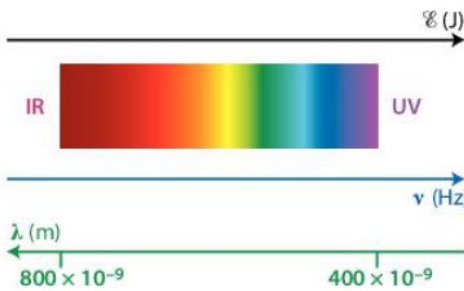
explique l'effet photoélectrique

Le photon

- Particule de **masse nulle** qui se propage à la **célérité de la lumière** : $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.
- Énergie d'un photon associé à une **radiation de fréquence ν** :

$$\mathcal{E}_{\text{photon}} = h \times \nu = \frac{h \times c}{\lambda}$$

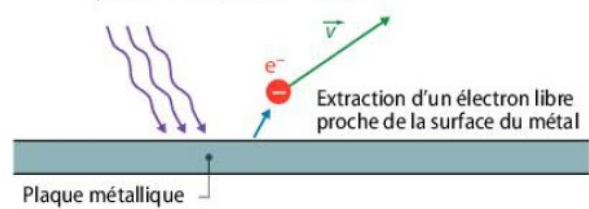
\mathcal{E} en J, h en J·s, c en m·s⁻¹, ν en Hz ou s⁻¹, λ en m



L'effet photoélectrique

- **Éjection d'électrons d'un métal** sous l'effet d'une **radiation de fréquence suffisamment élevée** donc pour des photons d'énergie **suffisamment grande**.
- **Bilan énergétique de l'effet photoélectrique pour un électron libre proche de la surface du métal** :

$$\mathcal{E}_{\text{photon}} = W_{\text{extraction}} + \mathcal{E}_{c \text{ max}}$$



$$h \times \nu_{\text{photon}} = W_{\text{extraction}} + \frac{1}{2} m_e \times \nu_{\text{max}}^2$$

$W_{\text{extraction}}$ en J, h en J·s, ν_{photon} en Hz ou s⁻¹, m_e en kg, ν_{max} en m·s⁻¹

$W_{\text{extraction}}$ est l'énergie nécessaire pour extraire un électron libre proche de la surface du métal.

2 L'absorption ou l'émission de photons

Une **cellule photoélectrique** désigne tout dispositif dont une des propriétés électriques est modifiée à l'absorption de photons.

	Photorésistance, photodiode, capteur d'appareil photographique	Cellule photovoltaïque	Spectroscopie
Absorption de photons	 Absorption de photons pour détecter la lumière	 Absorption de photons pour convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique Rendement : $\eta = \frac{\mathcal{P}_{\text{elec}}}{\mathcal{P}_{\text{lum}}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{elec}}}{\mathcal{E}_{\text{lum}}}$	 Absorption de photons pour réaliser des analyses chimiques

Dans tous ces dispositifs, il y a une **interaction photon-matière**.

DEL (diode électroluminescente)

Émission de photons

Émission de photons lorsque la DEL est parcourue par un courant électrique, sans toutefois qu'elle soit portée à haute température.

