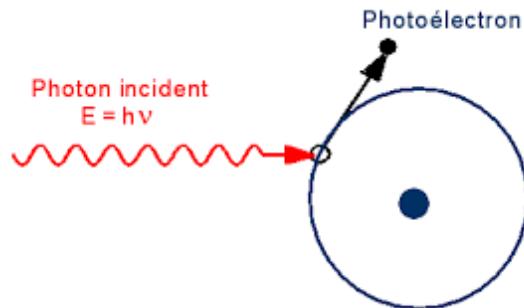


Chapitre 1

Du classique au quantique

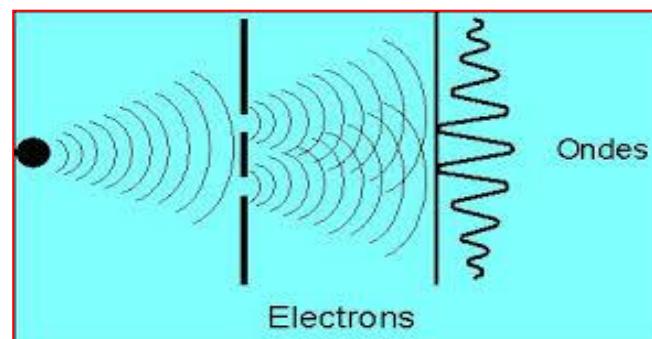
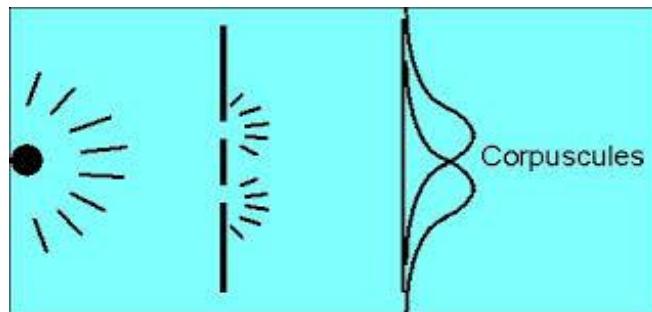
Interaction *rayonnement-matière*



- Avec la découverte des particules subatomiques, le besoin d'un nouveau type de mécanique quantique a commencé à émerger (apparaître).
- Pour expliquer les observations, les scientifiques faisaient, deux principes:
 - 1- Le *rayonnement* et la *matière* présentent des propriétés à la fois **ondulatoires** et **corpuscules**.
 - 2- **l'énergie** est **quantifiée** en paquets discrets (appelés photons).

Les points essentiels

- ❖ Dualité Onde-Corpuscule
- ❖ Comportement corpusculaire des ondes
 - ❖ Le rayonnement du corps noir (Planck 1900)
 - ❖ Effet photoélectrique (Einstein 1905)
 - ❖ Effet Compton (Compton 1923).
 - On envoie une onde sur deux fentes.**
Le passage Par les fentes crée des interférences
des franges apparaissent sur l'écran.
- ❖ Comportement ondulatoire des corpuscules
 - ❖ Relation de de Broglie (1924)
 - On envoie des particules sur deux fentes.**
On détecte leur impact sur un écran:
elles arrivent n'importe où.



Dualité Onde-Corpuscule

La lumière se présente sous deux aspects :

- ❖ Un aspect *ondulatoire* où elle considérée comme un phénomène vibratoire se propageant par **onde**.
- ❖ Un aspect *corpusculaire* où elle est formé de corpuscules appelés **photons** qui sont animés d'une vitesse C (célérité de la lumière) et transport un **quantum d'énergie**.

La physique quantique (1900-1930)

La théorie quantique est née alors que les physiciens voulaient expliquer les derniers points:

- Le spectre d'émission du corps noir.
- L'effet photoélectrique.

Particules vs Ondes

- Les particules. Elles sont localisées **spatialement** et, à chaque instant, on peut connaître exactement leur **position** et leur **vitesse**.
- Les ondes. Elles ne sont pas localisées dans **l'espace**. On les caractérise par leur longueur d'onde.
- Elles transportent de l'énergie mais celle-ci est délocalisée et répartie sur tout le front d'onde.

La théorie du corps noir

Section 1

Préface

- La théorie du **corps noir** est l'un des plus vieux problèmes de la physique théorique et il est à l'origine de la physique quantique.
- On retrouve la théorie du corps noir aussi bien lorsque l'on veut comprendre fondamentalement la **lumière** et la **matière** que lorsqu'on étudie les étoiles, les trous noirs.

Deux questions simples

- Pourquoi lorsqu'on chauffe un objet, celui-ci *émet-il de la lumière* ?
- Pourquoi la *couleur* de la lumière émise *change-t-elle avec la température* ?
- ✓ C'est en découvrant les réponses à ces deux questions que les physiciens ont franchit la distance séparant la physique classique de la physique quantique.

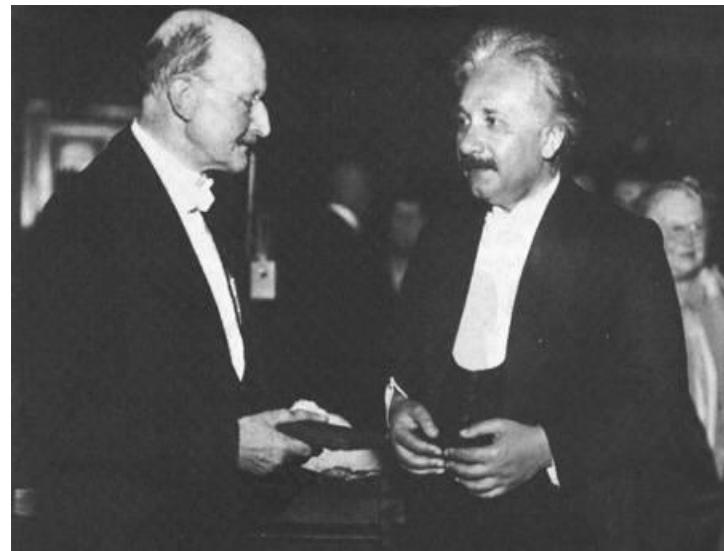
Le problème du corps noir

- Le problème du **corps noir** consiste à comprendre et décrire mathématiquement ce qui se passe quand un morceau de **fer chauffé** passe de la couleur *rouge* à la couleur *blanche*, en émettant une quantité de lumière de plus en plus importante.



Le défi des plus grands esprits

- Le problème du corps noir a défié les plus grands esprits, de Kirchhoff à Hawkins en passant par Planck et Einstein. Il est à l'origine de la théorie quantique, du modèle atomique et des particules élémentaires.



À gauche Max Planck et à droite
Albert Einstein.

Contribution de Kirchhoff



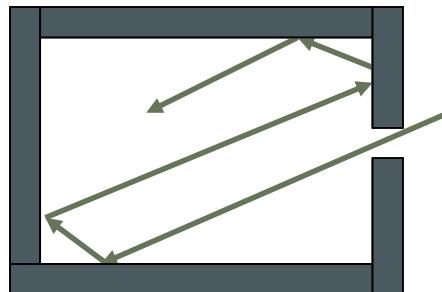
Gustav Kirchhoff

- En 1859, Kirchhoff montra que le rayonnement émis par les objets qui absorbent tout le rayonnement incident ne dépend pas de la nature de l'objet.
- Un tel objet est appelé *corps noir* car à cause des températures faibles, il est noir (il absorbe la lumière incidente et son rayonnement émis n'est pas visible).

Comment faire *un corps noir*

Kirchhoff a indiqué comment construire un corps noir. Il s'agit de former une cavité dans un corps solide dont les parois sont gardées à une température constante et uniforme T et de percer un petit trou dans l'une de ses parois.

L'ouverture est un corps noir car la lumière qui entrera dans la cavité sera absorbée par les parois de celle-ci. Le rayonnement qui sortira par l'ouverture sera uniquement le rayonnement émis par le corps noir.



Propriétés importantes du rayonnement thermique

Les chercheurs du XIX^e siècle découvrirent deux propriétés importantes du rayonnement thermique:

- À mesure que la température augmente, l'intensité du rayonnement émis par un corps augmente rapidement.
- Plus la température du corps est élevée, plus la longueur d'onde associée au maximum de la distribution du rayonnement est courte.

La loi du déplacement de Wien

La relation de Wien est:

$$\lambda_{\max} T = 2,898 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

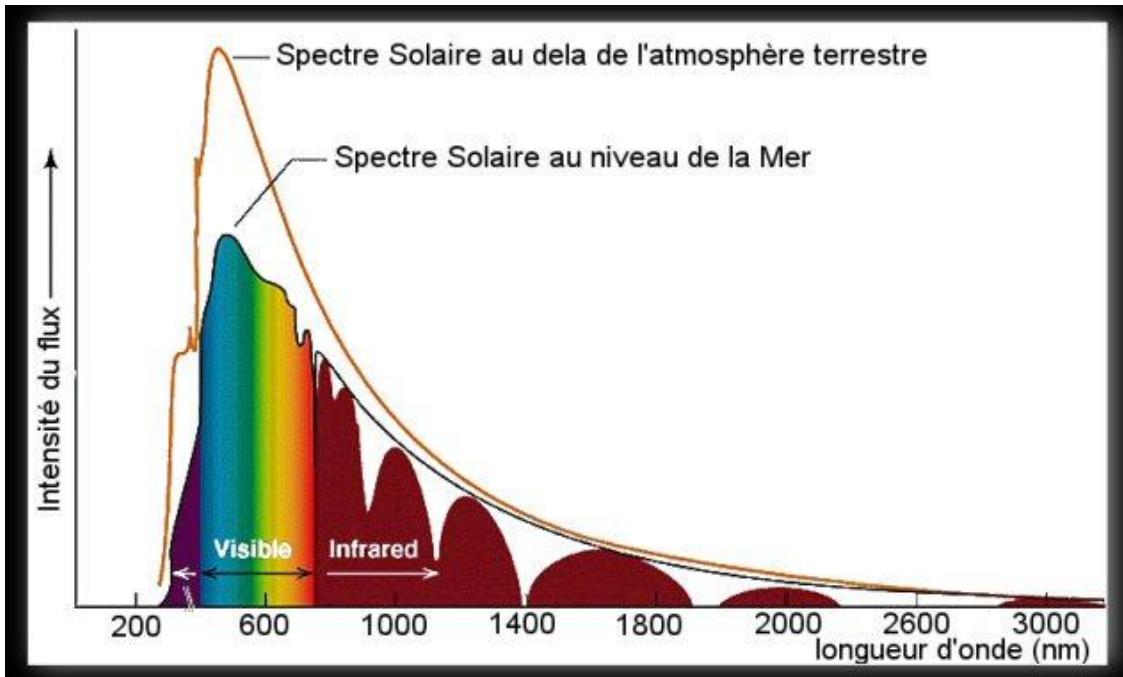
Où λ_{\max} est la longueur d'onde pour laquelle l'intensité du rayonnement émis par le corps noir à une température T est maximale.

- ✓ Cette relation fait le lien entre une température et une longueur d'onde, et crée un lien entre une température et une couleur, ce qui permet de définir la température liée à la couleur de l'objet.



Application: Exemple 1

Le pic du rayonnement solaire est situé à 500 nm environ.
Déterminez la température de surface de notre Soleil.



Réponse: $5,80 \times 10^3 \text{ K}$ $\lambda_{\max} T = 2,898 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$

Application: Exemple 2

La température de la peau est voisine de 35 ° C. Quelle est la longueur d'onde du pic d'intensité du rayonnement émis par la peau ?

$$\lambda_{\max} T = 2,898 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

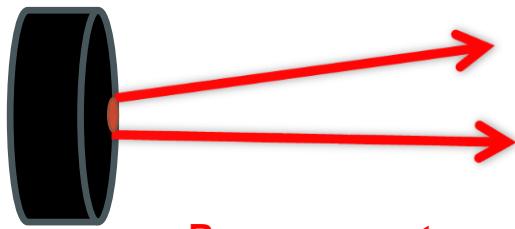
Réponse: longueur d'onde= $9,4 \times 10^{-6} \text{ m} = 9,41 \mu\text{m}$

Un corps noir



Deux corps noir vus de face

La radiance spectrale



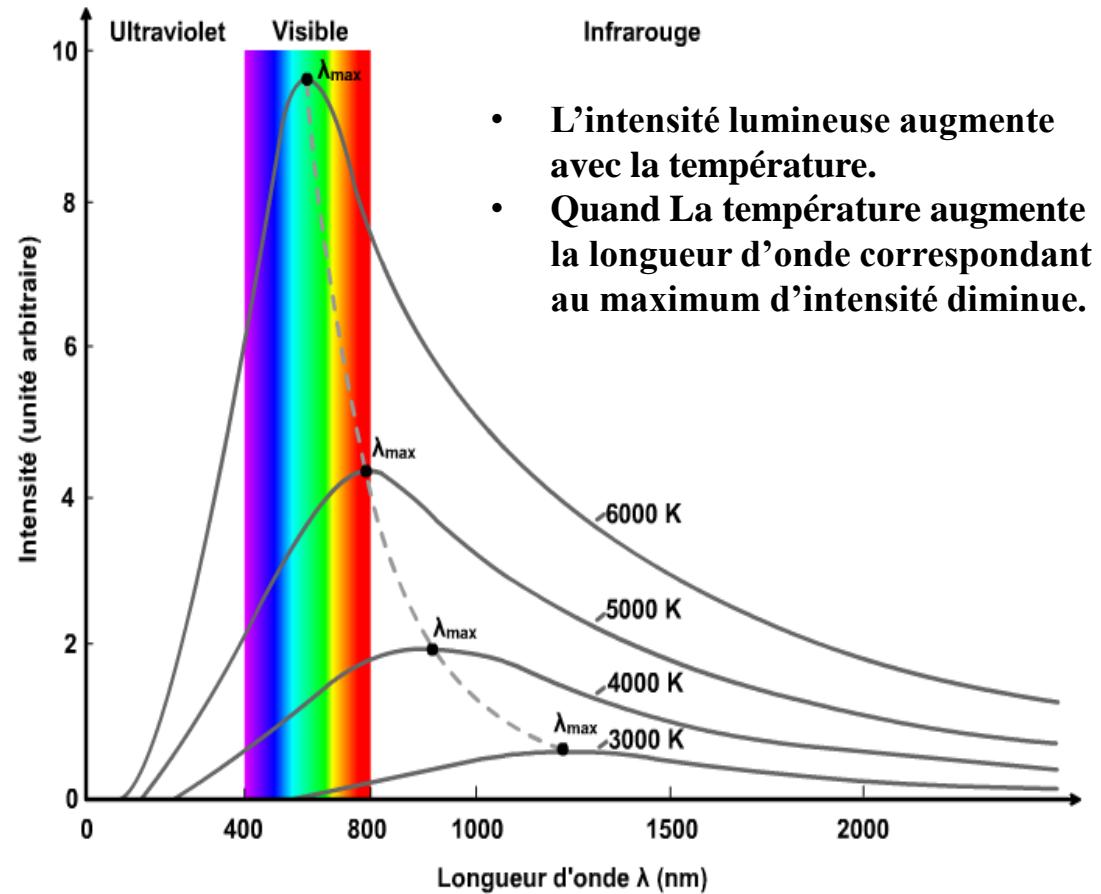
Rayonnement

T1= 3000k

T2= 5000k

T3= 6000k

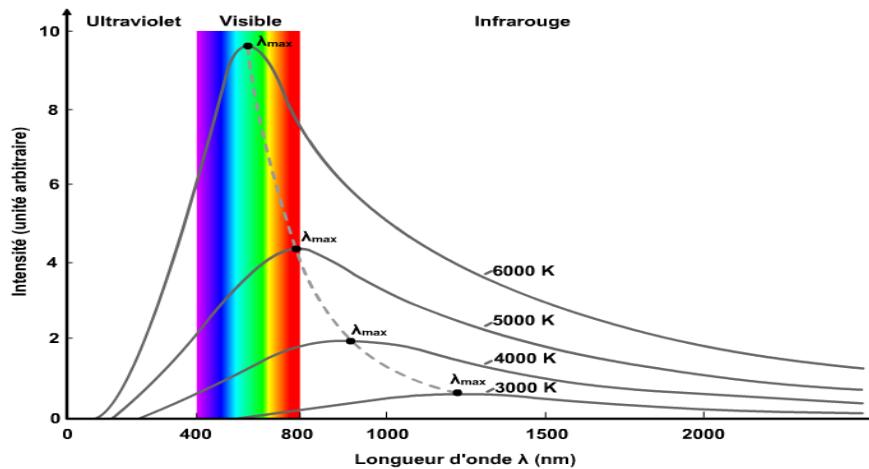
T4= 8000k



Comment expliquer ce comportement?

Données expérimentales de la distribution d'énergie du rayonnement d'un corps

- Si la **température** augmente, la quantité totale d'énergie augmente.
- Lorsque la température augmente, le pic est décalé vers des longueurs d'onde plus courtes.



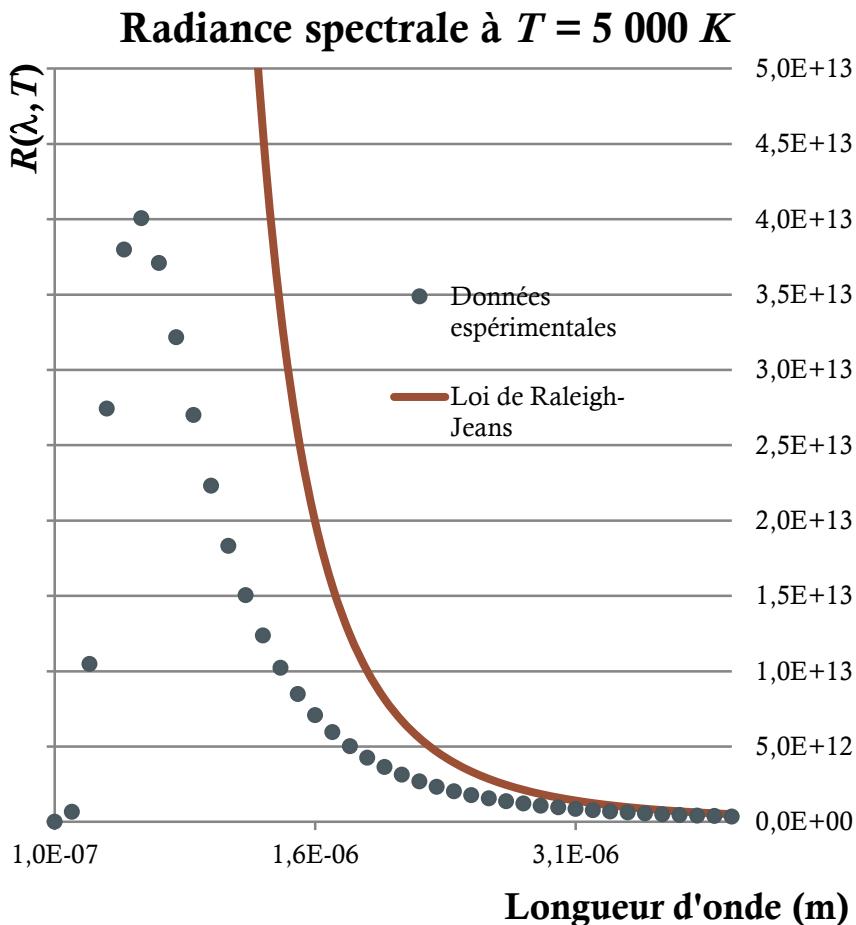
La loi de Rayleigh-Jeans



John William Rayleigh

- En 1900, *Rayleigh* proposa d'analyser les propriétés d'absorption et d'émission à l'intérieur du corps noir en le modélisant par un ensemble d'oscillateurs harmoniques pouvant absorber ou émettre la lumière pour toutes les fréquences du rayonnement.

La catastrophe de l'ultraviolet



- La théorie classique n'expliquait pas les données expérimentales.
- Pour de grandes longueurs d'onde, la loi de Rayleigh-Jeans convenait.
- Mais elle est totalement inadéquate pour des courtes longueurs d'onde (tend vers l'infini).
- Pour des très courtes longueurs d'onde, l'observation indiquait une énergie nulle.
- Cette contradiction est appelée « *catastrophe ultraviolette* ».

Loi de Max Planck

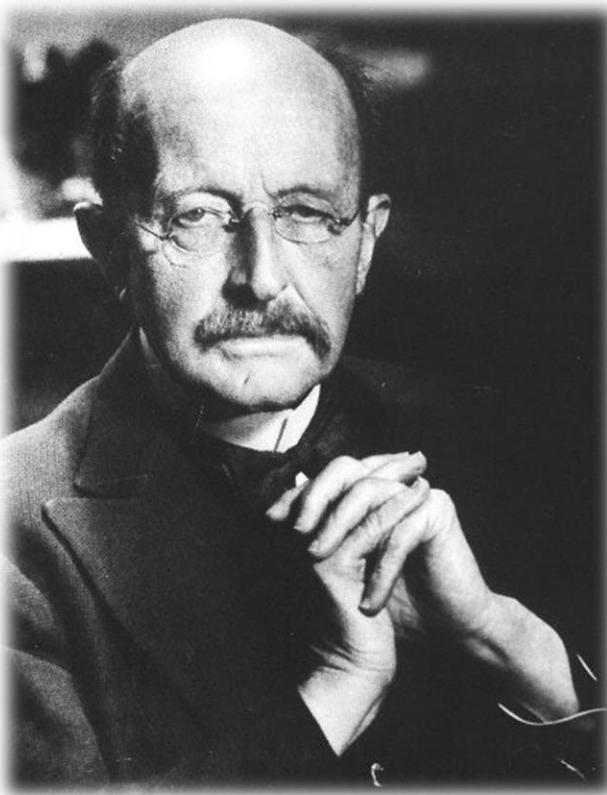
- Les échanges d'énergie entre la matière et le rayonnement ne se font pas de façon **continue** mais par quantités **discrètes** et indivisibles.

$$E = nh\nu \quad n=1,2,3\dots$$



Max Planck (23 avril 1858 - 4 octobre 1947)

Idée géniale de Planck



- Selon Planck, les parois de la cavité se comportent comme des petits oscillateurs harmoniques.
- Les oscillateurs ne pouvaient osciller qu'avec une énergie représentant un multiple de $h\nu$.

$$E = nh\nu \quad n=1,2,3\dots$$

La constante de Planck

- *La matière ne peut émettre l'énergie radiante que par quantités finies proportionnelles à la fréquence. Donné par l'expression:*

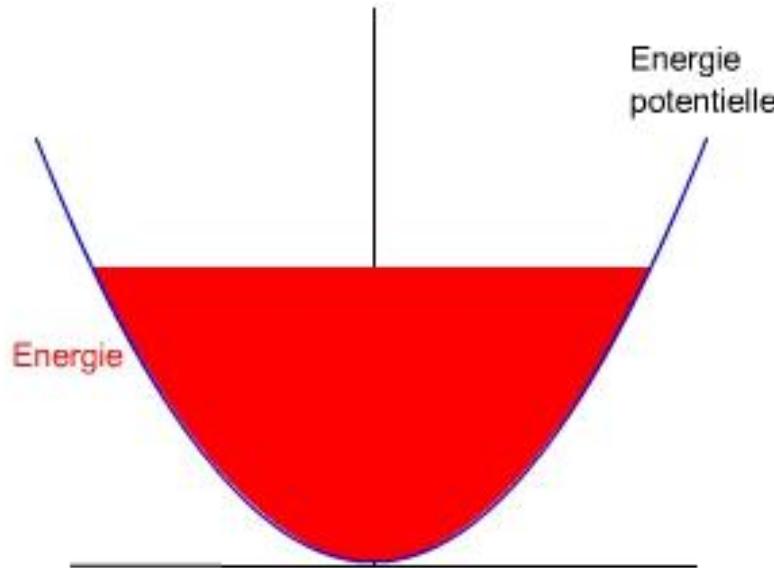
$$E = h\nu$$

E: est l'énergie (J), ν : est la fréquence (s^{-1})

- Le facteur de proportionnalité est une constante universelle, la célèbre constante de Planck: $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$
- Les échanges d'énergie entre matière et rayonnement se font uniquement par des multiples entière d'une quantité minimale d'énergie E appelée quantum ou énergie du photon..

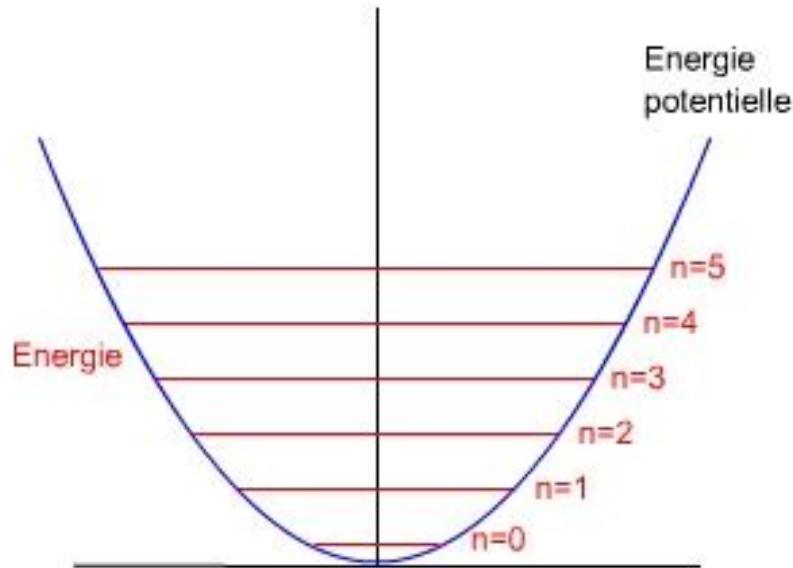
Physique classique vs physique quantique

- Physique classique: les échanges d'énergie se font de façon continue.



Oscillateur harmonique classique

- Physique quantique: les échanges se font de façon discrète par paquets d'énergie.



Oscillateur harmonique quantique

L'interprétation d'Einstein

- Einstein, en 1905, postule que chaque oscillateur possède une énergie quantifiée: nh où n est le niveau d'énergie. Il parle ici de quantité quantifiée
- C'est la naissance du photon et le début de la quantification de l'énergie...mais tous n'y croient pas.
- Il a supposé que chaque onde est composée de corpuscules: Photons. Ceux-ci transportent des quanta d'énergie hv .



L'effet photoélectrique et Einstein(1905)

- Lorsque la lumière est dirigée vers la cathode, des électrons quittent cette dernière et se déplacent vers une anode chargée positivement. Un courant électrique traverse la cellule dite photoélectrique.
- L'expérience montre que l'utilisation d'une lumière de **fréquence inférieure** à une certaine valeur appelée *le seuil de fréquence ne produit aucun effet*, quel que soit son **intensité**. Par contre, une fréquence **supérieure** au seuil, une intensité plus élevée provoque une augmentation du nombre d'électrons expulsés (Figure 1.1).

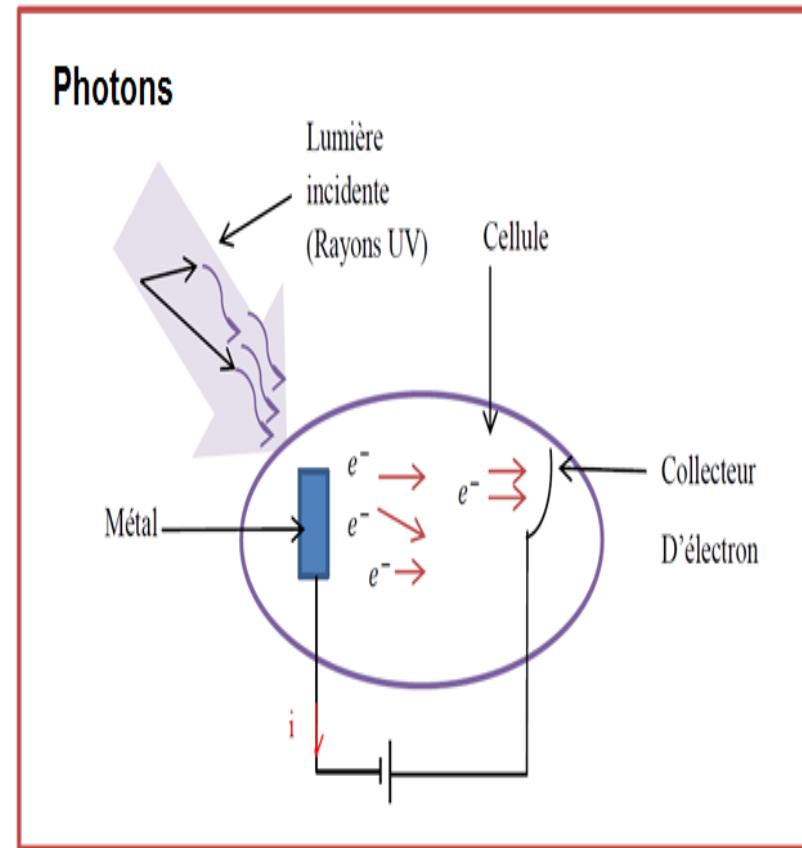
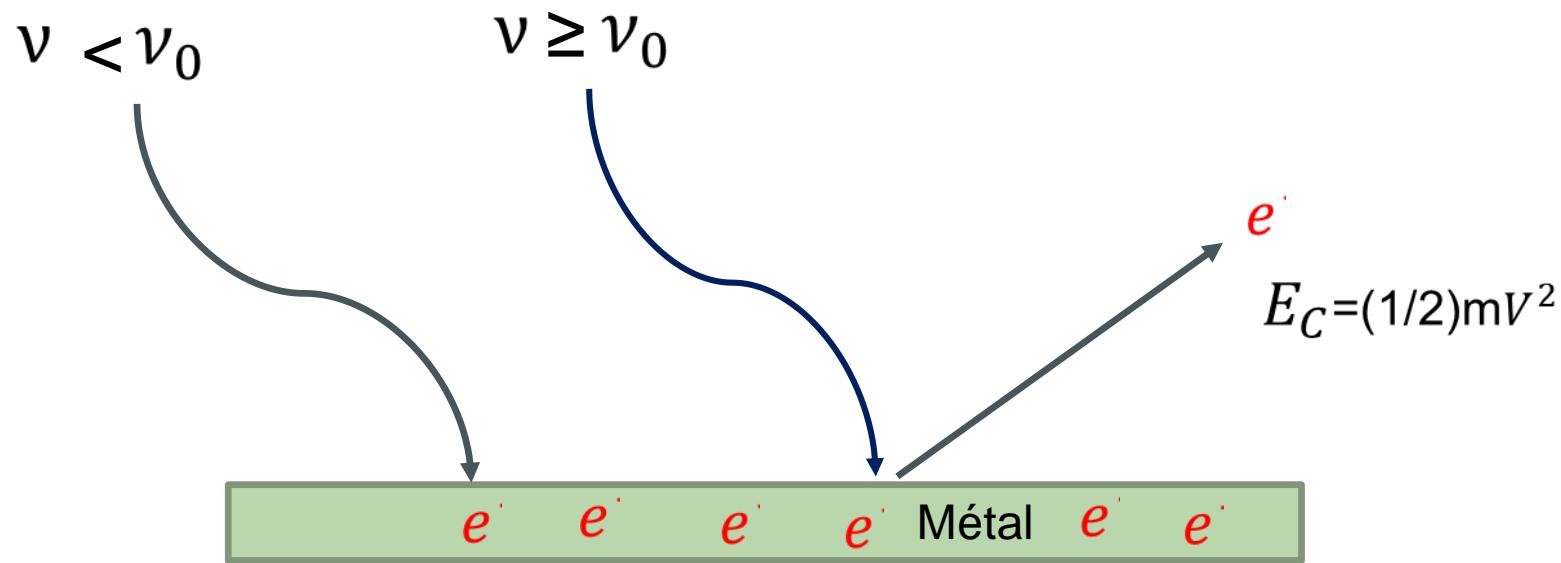


Figure 1.1 L'effet photoélectrique.

L'effet photoélectrique

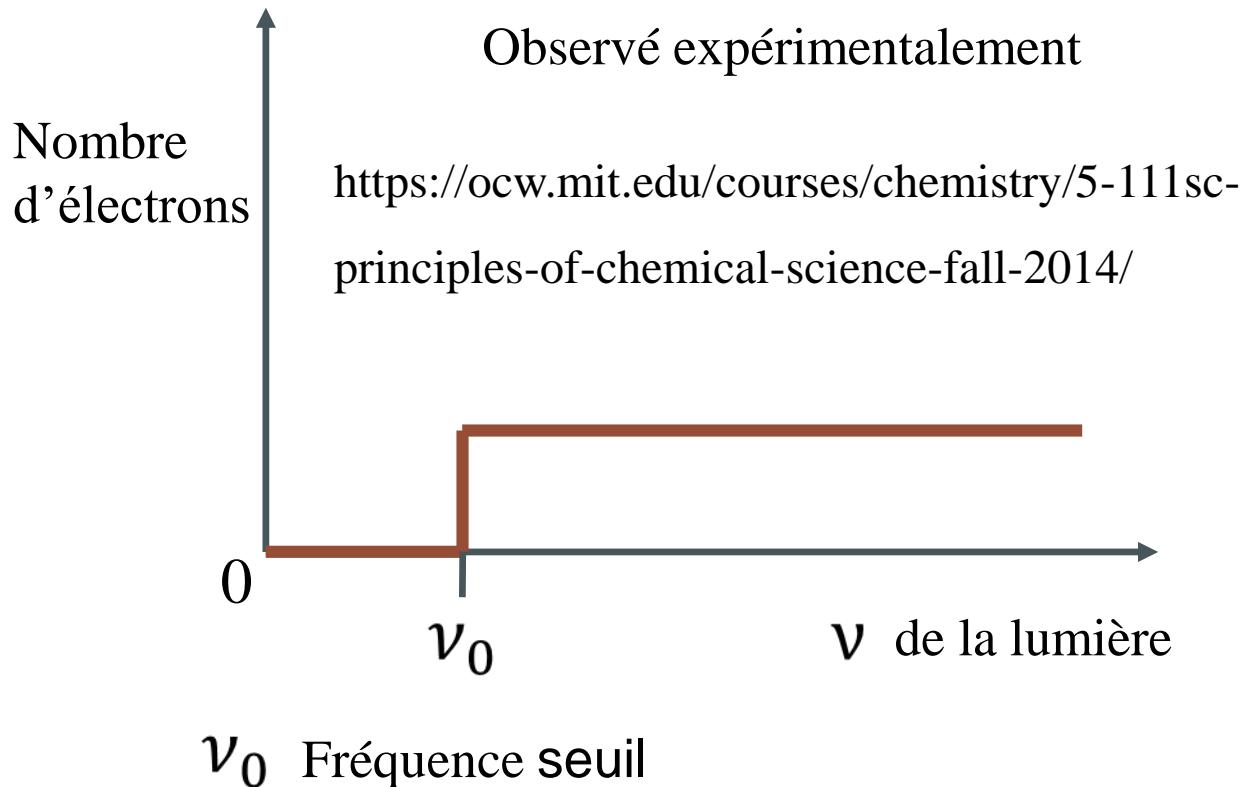
Un faisceau de lumière **UV** frappant une surface métallique peut éjecter des électrons



Pour l'éjection d'électrons

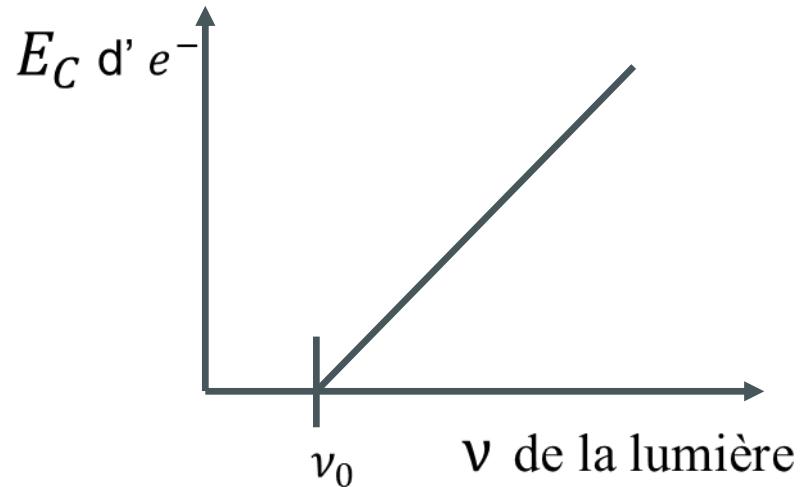
La fréquence, **V** doit être égale ou supérieure à une fréquence de seuil ν_0

À l'intensité constante, **la fréquence v** de la lumière n'a aucun effet sur **le nombre d'électrons** émis

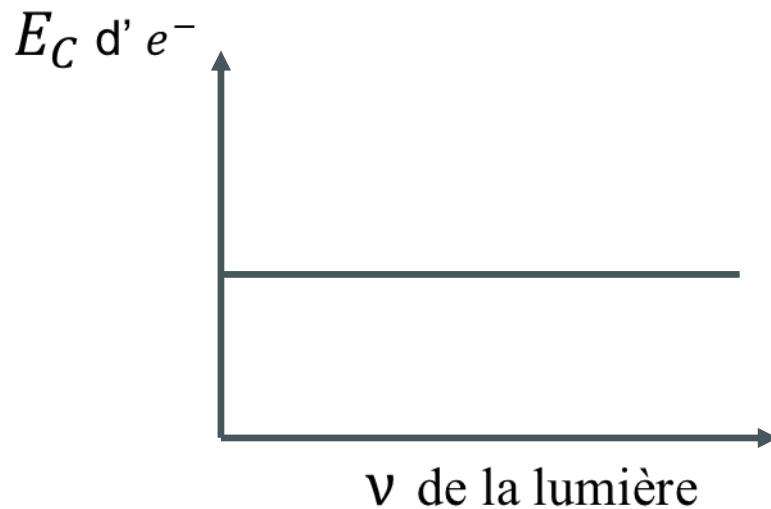


Traçant **l'énergie cinétique** E_C des électrons éjectés en fonction de **la fréquence** de la lumière incidente.

- Observé expérimentalement

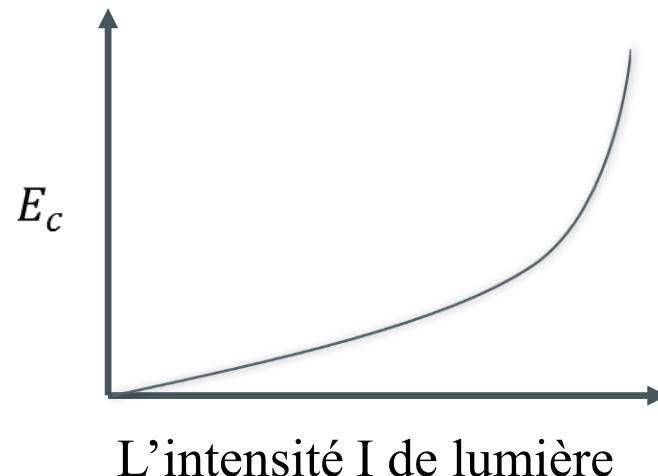
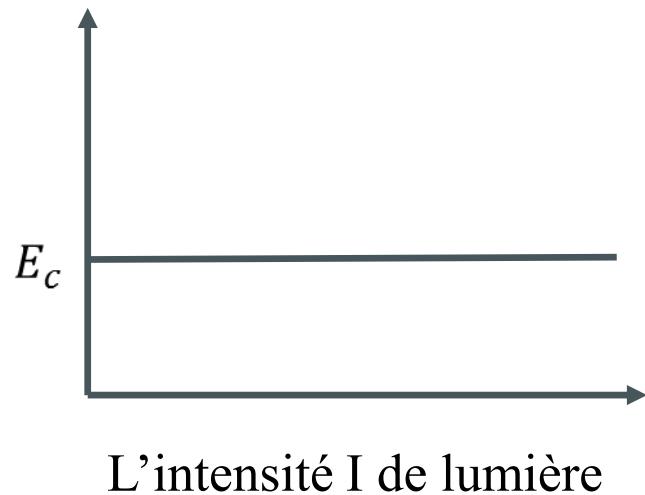


- Prédit de la physique classique



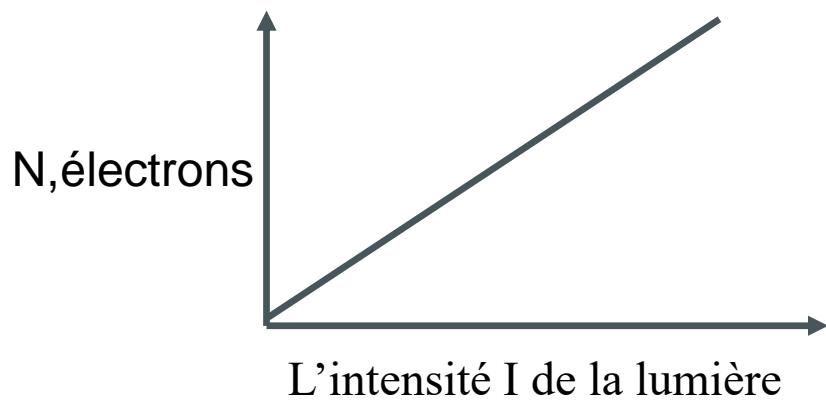
Traçant l'énergie cinétique Ec des électrons éjectés en fonction de l'intensité de la lumière incidente

- Observé expérimentalement
- Prédit de la physique classique

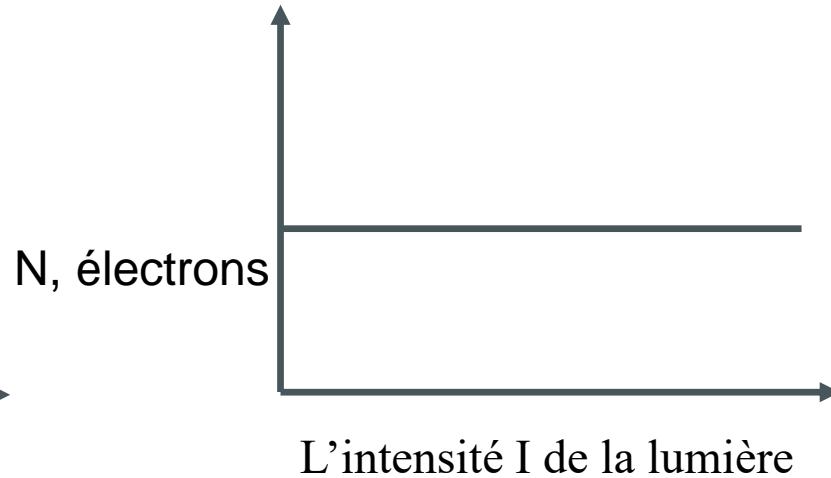


Traçant le nombre d'électrons éjectés en fonction de l'intensité de la lumière incidente.

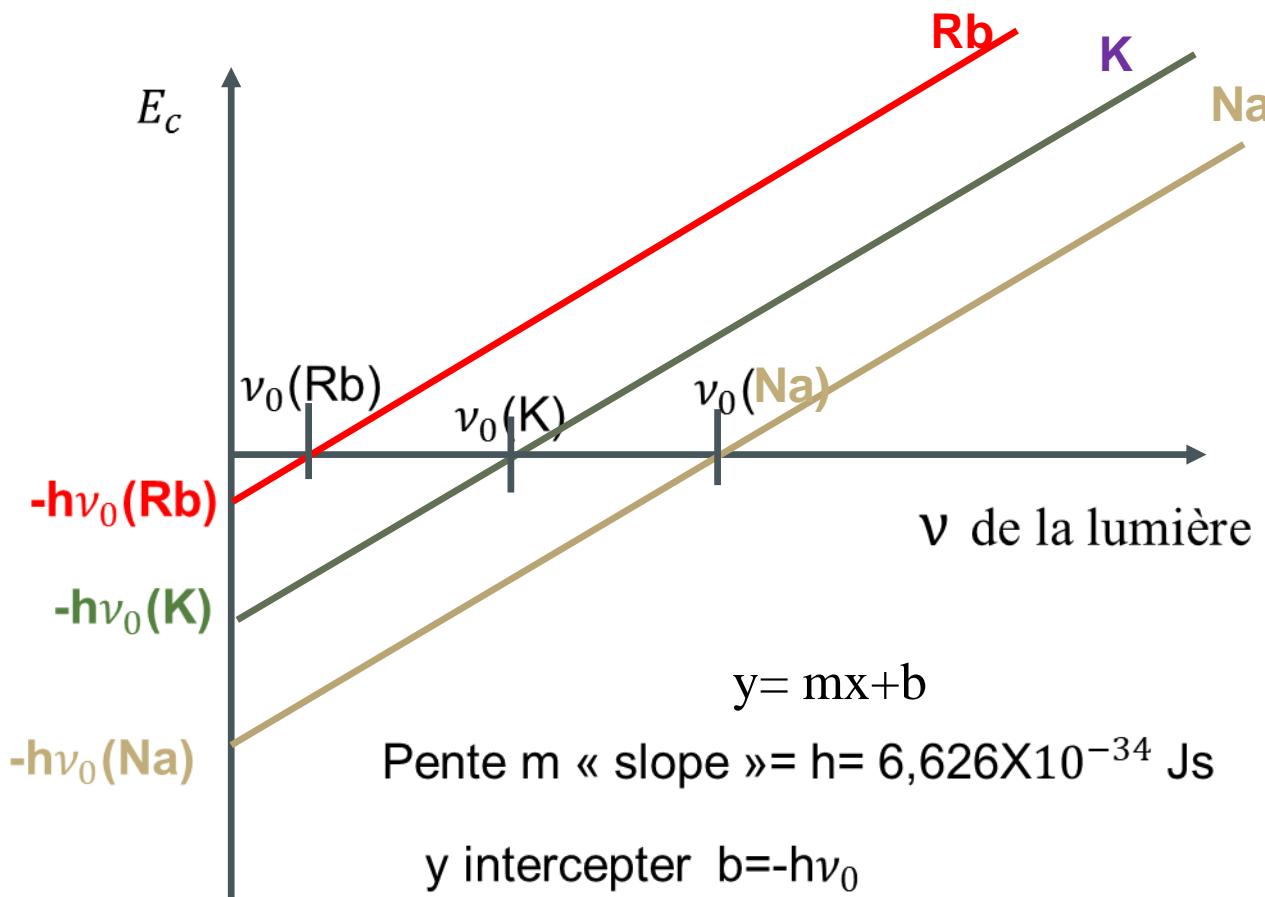
- Observé expérimentalement



- Prédit de la physique classique



Tracé de l'énergie cinétique en fonction de ν pour plusieurs métaux



Einstein pourrait réécrire l'équation de la droite:

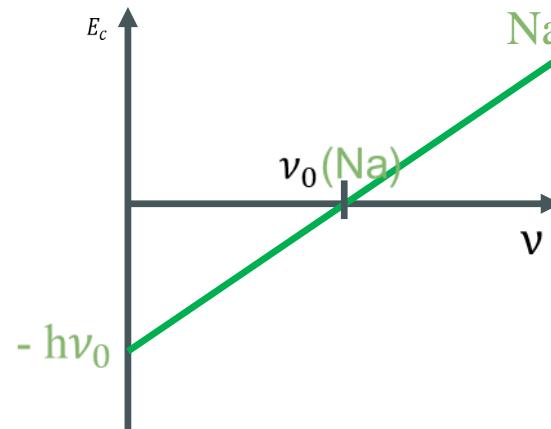
l'énergie de la lumière est proportionnelle à sa fréquence

$$Y = mx + b$$

$$E_C = h\nu - h\nu_0$$

ν fréquence de la lumière incidente

$h\nu = E_i$ = L'énergie de la lumière incidente



la lumière est composée de paquets d'énergie appelés photons

L'énergie cinétique

$$E_C = h\nu - h\nu_0$$

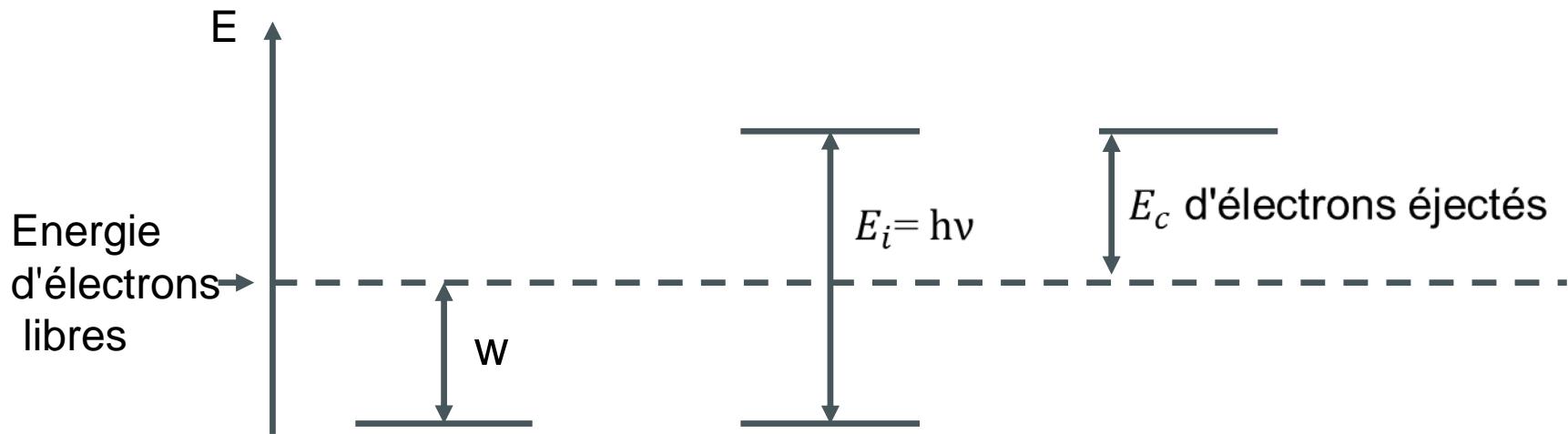


Einstein 1905

L'énergie de la lumière est proportionnelle à sa fréquence

$$E_C = h\nu \text{ (Js)}(s^{-1}) = J$$

Un nouveau modèle pour l'effet photoélectrique

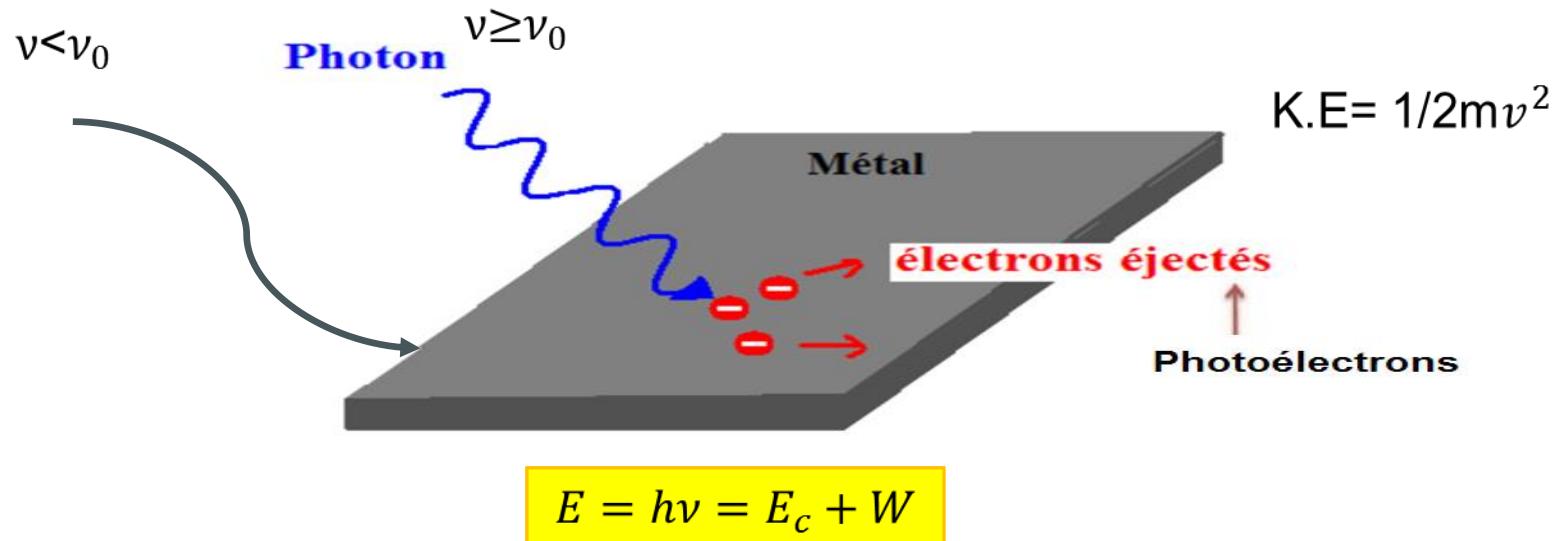


L'énergie d'un photon incidente $E_i \geq W$ fonction de travail du métal, afin d'éjecter un électron.
toute énergie restante est l'énergie cinétique.

$$E_i = E_c + W$$

L'Effet photoélectrique

Un faisceau de lumière **UV** frappant une surface métallique peut éjecter des électrons



- Un **photoélectron** est un électron émis par **effet photoélectrique**.
- La fréquence minimum nécessaire pour produire des photoélectrons correspond au cas où $E_{max} = 0$. elle donnée par:

ν_0 : la fréquence de seuil

$$W_0 = h\nu_0$$

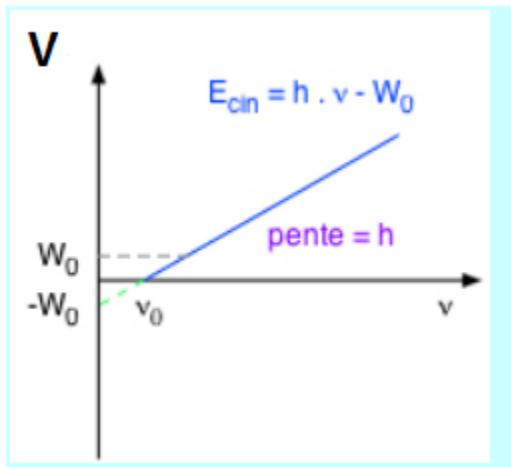
L'effet photoélectrique et Einstein

- En 1905, Albert Einstein met à profit les idées de quantification de l'énergie émises par Planck et réussit à expliquer l'effet photoélectrique, au cours duquel un métal exposé à la lumière éjecte des électrons. Pour une lumière monochromatique.
- l'énergie cinétique maximale des photoélectrons est *indépendante de l'intensité* lumineuse et ne dépend que de la fréquence de l'onde incidente. Pour chaque métal, il existe un seuil en fréquence, v_0 au-dessous duquel aucun électron n'est émis et cela quelle que soit l'intensité de l'onde lumineuse.

L'interprétation de l'effet photoélectrique

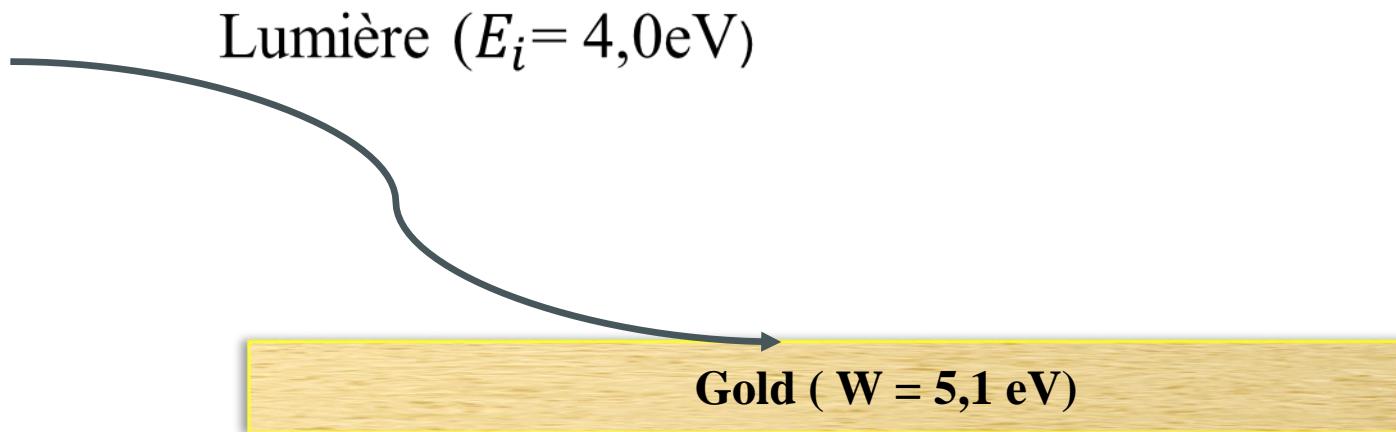
- Les électrons d'un métal sont piégés dans un puits de potentiel. Il faut fournir une énergie **W** pour les extraire.
- Lorsqu'un photon est absorbé par la surface métallique, son énergie **hν** sert à extraire un électron et à lui communiquer une énergie cinétique **E_c** . Ceci se traduit par l'équation :
 - $E = h\nu = E_c + W(h\nu_0)$
 - $h\nu - h\nu_0 = Ec = eV$
 - $V = \frac{h}{e}(\nu - \nu_0)$
 - $h(\nu - \nu_0) = eV$

L'interprétation de l'effet photoélectrique



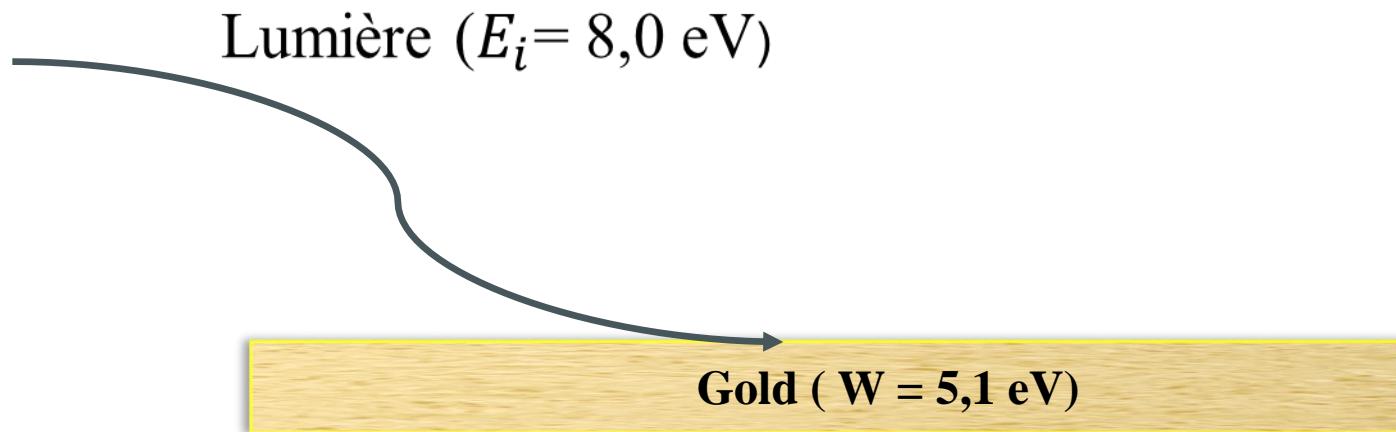
- On obtient une valeur de h qui coïncide exactement avec la constante de Planck.
 - Le travail d'extraction (W) dépend de la **nature du métal** considéré. Il vaut par exemple **4,5 eV** pour le **tungstène**, mais seulement **1,8 eV** pour le **césium**.
- Le travail d'extraction est l'énergie minimum qu'il faut fournir à l'électron pour l'arracher au métal.

Si un faisceau de lumière avec une énergie = 4.0 eV ($1\text{eV}=1,6\times10^{-19}\text{J}$) frappe une surface d'or, quelle est l'énergie cinétique maximale des électrons éjectés?



1. $E_c = 9,1 \text{ eV}$
2. $E_c = 5,1 \text{ eV}$
3. $E_c = 1,1 \text{ eV}$
4. $E_c = 4,0 \text{ eV}$
5. Aucun électron ne sera éjecté

Si un faisceau de lumière avec une énergie = 8.0 eV
(1eV=1,6x10⁻¹⁹J) frappe une surface d'or, quelle est l'énergie cinétique maximale des électrons éjectés?



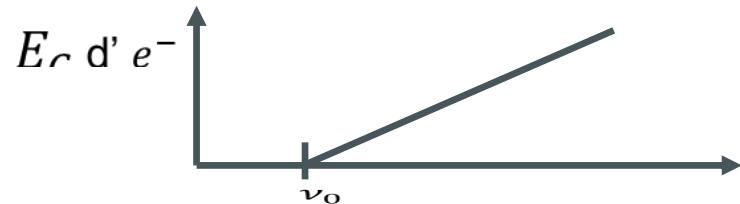
1. $E_c = 13.1 \text{ eV}$
2. $E_c = 2.29 \text{ eV}$
3. $E_c = 8.0 \text{ eV}$
4. $E_c = 5.1 \text{ eV}$
5. Aucun électron ne sera éjecté

Applications

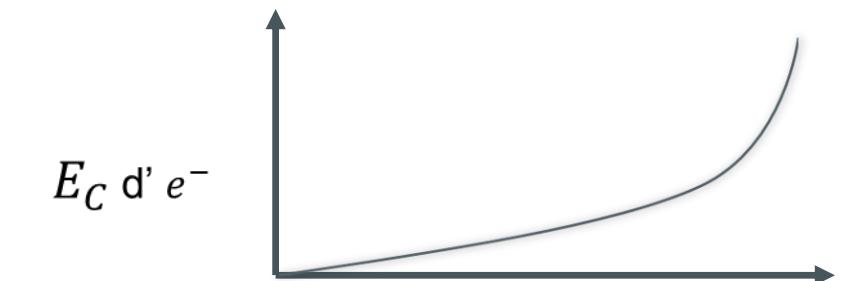
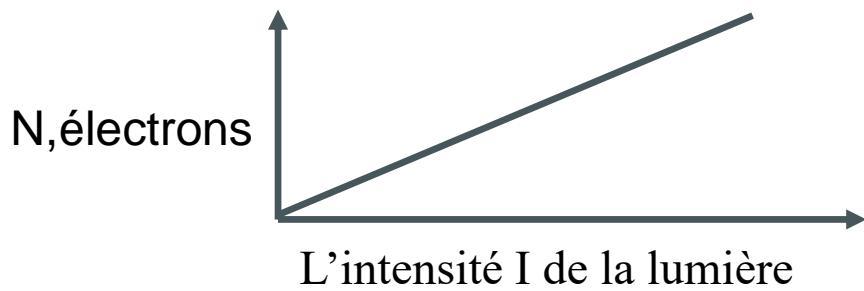
- Il est utilisé dans de nombreux instruments :
- Les cellules des panneaux solaires par exemple, fonctionnent avec l'effet photo-électrique, les dispositifs de commande tels que la mise en marche d'un escalier roulant, l'ouverture automatique d'une porte, le déclenchement d'un système d'alarme....
- Les photodiodes qui peuvent être utilisées, par exemple d'une télécommande de télévision....



- Observé expérimentalement

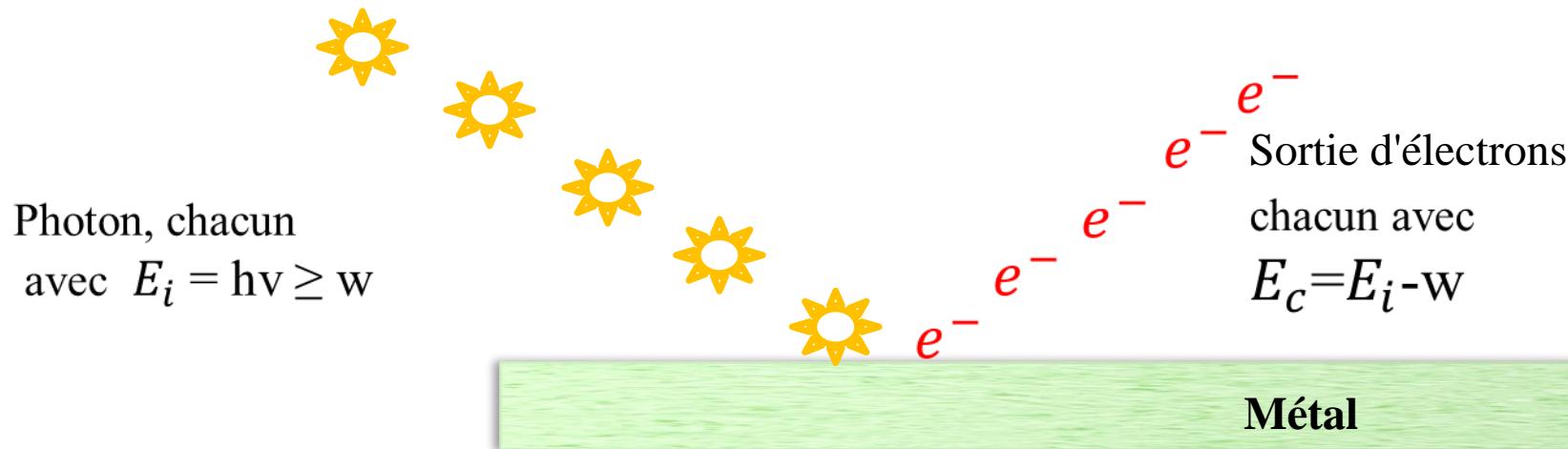


- Prédit de la physique classique



- $E_i = E_c + W = E_C = h\nu - h\nu_0$
- Au dessus de ν_0
- Augmente ν
- Augmente E_C

Le **nombre d'électrons** éjectés de la surface d'un métal est proportionnel au **nombre de photons** absorbés par le métal.



- Ainsi, **l'intensité** de la lumière est proportionnelle au **nombre de photons** absorbés et au **nombre d'électrons** émis.
- Unité de l'intensité = Watt (W) = J/s.

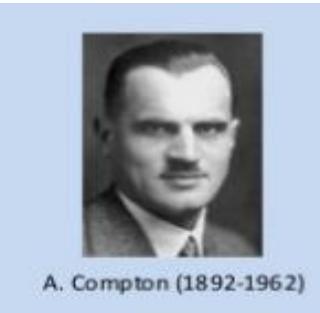
- L'énergie cinétique ne change pas car une intensité élevée signifie plus de photons / sec et pas plus d'énergie / photon.
- Le nombre d'électrons émis change car une intensité élevée signifie plus de photons.
- Pour expliquer les données observées:
- la lumière est constituée de paquets discrets appelés photons (elle est quantifiée).
- l'énergie d'un photon est proportionnelle à sa fréquence ($E = h\nu$).
- Intensité de la lumière = photons par seconde.

Exemple.1

- **Exercice 1.** Une cellule photoélectrique a une cathode recouverte de césium. Le travail d'extraction d'un électron du césium est de 1.9 eV.
 - On éclaire cette cathode par 2 radiations électromagnétique 1 et 2 de longueurs d'onde $\lambda_1=750$ nm et $\lambda_2=540$ nm. Quelle radiation permettra l'effet photoélectrique? justifier

Effet Compton

- *Le rayonnement du corps noir* montre que l'énergie d'une onde électromagnétique de fréquence ν est quantifiée.
- *L'effet photoélectrique* indique que, lors de l'interaction avec la matière, l'onde peut se comporter comme un faisceau de photons d'énergie $h\nu$.
- L'effet Compton complète cette description corpusculaire en montrant qu'un photon a non seulement une énergie, mais une impulsion p donnée par la relation:
$$P = \hbar k$$
- \hbar la constante de Planck divisée par 2π ($\hbar=\frac{h}{2\pi}$).
- k le vecteur d'onde associé à l'onde électromagnétique.



Comportement ondulatoire des corpuscules

- **Louis de Broglie** en 1924 postule le caractère ondulatoire des particules d'impulsions **p**. Il supposait alors qu'une onde peut être associée à chaque particule. sa longueur d'onde est donnée par la relation:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mV}$$

Longueur d'onde
(de de Broglie)
Attribut
(Ondulatoire)

Impulsion
Attribut
(Corpusculaire)

Références

<http://www-igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2003/Quantique/Dualite%20onde-corpuscule.htm>

<https://ocw.mit.edu/courses/chemistry/5-111sc-principles-of-chemical-science-fall-2014/>

Lecture 3: Wave-particle Duality of Light