

Interaction lumière-matière

I. Modèles de la lumière ; interaction lumière-matière

À la fin du XIX^e siècle et au début du XX^e siècle, les expériences de diffraction et d'interférences ont montré que la lumière possède une nature ondulatoire.

Les scientifiques de l'époque pensaient donc que l'interaction entre la lumière et la matière se faisait de manière continue. Comme une vague à la surface de l'eau transmet progressivement de l'énergie à une bouée, la lumière était supposée transmettre progressivement son énergie aux électrons de la matière.

Ainsi, on imaginait qu'un électron d'un métal pouvait accumuler peu à peu l'énergie reçue de la lumière, proportionnellement à l'intensité lumineuse et à la durée de l'éclairement, jusqu'à être éjecté du métal.

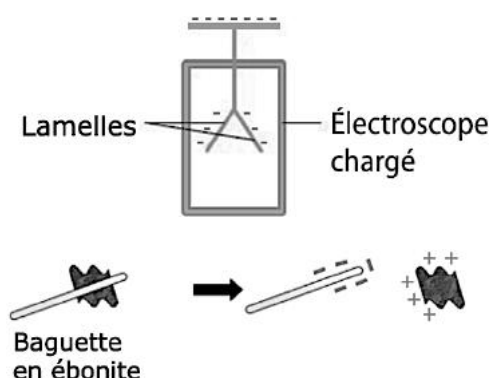
Application 1 Electroscope

Un électroscope est constitué d'un plateau métallique relié à deux fines lamelles métalliques.

Au départ, l'électroscope ne porte pas de charge électrique : les deux lamelles restent parallèles et rapprochées.

On peut ensuite charger l'électroscope par contact. Pour cela, on frotte une tige d'ébonite avec de la laine : la tige devient alors chargée négativement. Lorsqu'on touche le plateau de l'électroscope avec cette tige, des charges négatives se répartissent sur l'ensemble de l'appareil.

Les deux lamelles portent alors des charges de même signe. Elles se repoussent sous l'effet des forces électrostatiques et s'écartent. Plus la quantité de charge apportée est grande, plus l'écartement des lamelles est important.



 Regarder le film sur « Effet photoélectrique »



1. Préciser si l'électroscope reste chargé ou se décharge pour :

① $\lambda = 254 \text{ nm}$.

② $\lambda = 365 \text{ nm}$

③ λ visible

2. Qu'observe-t-on :

- Lorsqu'on augmente l'intensité lumineuse de la lumière visible ?
- Lorsqu'on augmente la durée de l'éclairement ?

3. Ces observations sont-elles compatibles avec le modèle ondulatoire de la lumière ? Expliquez

Application 2 Quanta d'énergie, le photon

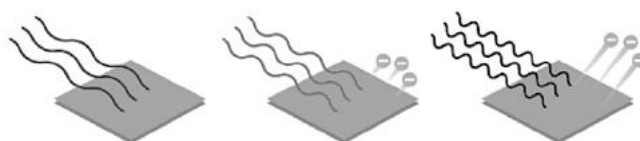
 Regarder le film « Einstein et l'effet photoélectrique »

Lorsqu'un métal est éclairé par un rayonnement ultraviolet, des électrons peuvent être arrachés à sa surface : ce sont les photoélectrons. Ce phénomène est appelé effet photoélectrique.



Les expériences montrent que :

- l'émission des électrons est immédiate ;
- elle ne dépend pas de la durée d'éclairement ;
- elle ne dépend pas de la puissance lumineuse ;



- elle ne se produit que si la fréquence ν de la lumière est supérieure à une fréquence seuil ν_0 , caractéristique du métal.

Si la fréquence de la lumière est inférieure à cette fréquence seuil, aucun électron n'est émis, même avec une lumière très intense.

Pour expliquer ces observations, Albert Einstein propose en 1905 que la lumière soit constituée de petits paquets d'énergie appelés quanta, plus tard nommés **photons**.

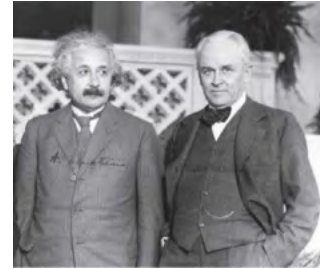
Chaque photon possède une énergie : $E = h \nu$

Pour arracher un électron au métal, l'énergie du photon doit être au moins égale au travail d'extraction W_{ext} , caractéristique du matériau.

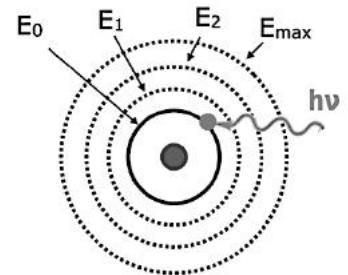
- Si $E < W_{\text{ext}}$: aucun électron n'est éjecté.
- Si $E \geq W_{\text{ext}}$: un électron est émis.
- Si $E > W_{\text{ext}}$: l'excès d'énergie est transféré sous forme d'énergie cinétique à l'électron.

Un électron ne peut absorber qu'un seul photon à la fois.

Ces résultats ont profondément modifié la compréhension de la lumière en montrant qu'elle possède aussi un **comportement corpusculaire**.



1. Rappeler la relation donnant l'énergie E d'un photon en fonction de sa longueur d'onde λ .
2. Un électron est initialement dans son état fondamental d'énergie E_0 (voir figure ci-contre). Quelle condition doit vérifier un photon de fréquence ν pour transférer son énergie à cet électron sans éjection de cet électron ?
3. Quelle condition sur la fréquence ν' du photon permet d'éjecter un électron de l'atome lorsqu'il est dans l'état E_0 ?



L'énergie minimale nécessaire pour arracher un électron à une plaque métallique est appelée travail d'extraction W_{ext} .

4. Établir la relation entre :
 - la fréquence ν' du photon incident,
 - le travail d'extraction W_{ext} ,
 - et l'énergie cinétique E_c de l'électron éjecté.

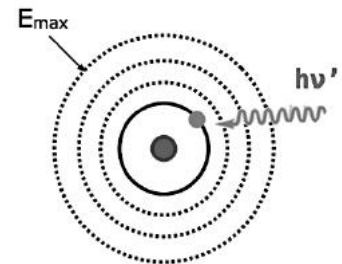


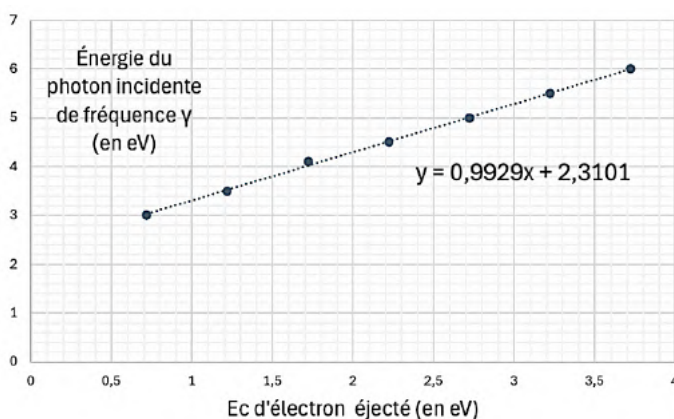
Schéma ci-contre :

On éclaire une plaque de sodium avec différentes radiations monochromatiques et on mesure la vitesse des électrons émis.

5. Déterminer, à l'aide de ce graphique, la valeur du travail d'extraction W_{ext} du sodium en joule.

$$1 \text{ eV} = 1,9 \times 10^{-19} \text{ J}$$

L'électronvolt (eV) est une unité d'énergie adaptée aux phénomènes microscopiques, notamment en physique atomique et nucléaire.



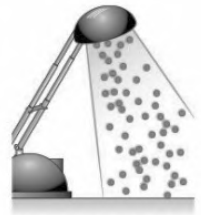
On considère que la lumière possède une **double description** :

- elle se propage comme une onde électromagnétique (Cf. **diffraction** et **interférence** des ondes);
- les échanges d'énergie avec la matière se font par paquets d'énergie, les photons. (Cf. effet photoélectrique)

Un photon

- Est une particule d'énergie de lumière de masse nulle ($m = 0 \text{ kg}$)
- Se déplace à la vitesse de la lumière ($c = 3,00 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$)
- Transport une quantité d'énergie donnée par

$$E = h\nu \quad \text{avec} \quad \begin{cases} E \text{ l'énergie transportée par le photon (en J)} \\ h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s la constante de Planck} \\ \nu = \frac{c}{\lambda} \text{ la fréquence de l'onde (en Hz)} \end{cases}$$

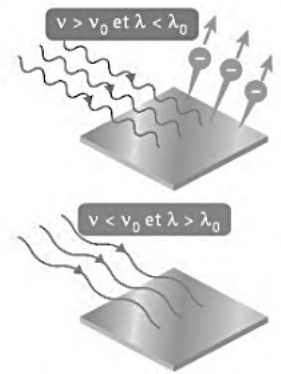


II. L'effet photoélectrique

L'effet photoélectrique est l'émission d'électrons par un matériau lorsqu'il est éclairé par un rayonnement électromagnétique.

Ce phénomène ne se produit que si la fréquence ν du rayonnement incident est supérieure à une fréquence minimale appelée fréquence seuil ν_s , caractéristique du matériau.

Le modèle particulaire de la lumière permet d'expliquer cet effet : lorsqu'un photon rencontre un électron du métal, il lui transfère toute son énergie puis disparaît. Si l'énergie transférée est suffisante ($\nu > \nu_s$), l'électron est éjecté du métal.



1. Travail d'extraction

Le travail d'extraction W_{ext} (en joules) correspond à l'énergie minimal nécessaire pour arracher un électron à un métal. Cette énergie minimale est égale à l'énergie d'un photon de fréquence seuil ν_s . On a donc :

$$W_{\text{ext}} = h\nu_s$$

2. L'énergie cinétique de l'électron extrait

L'énergie cinétique E_c d'un électron émis par effet photoélectrique dépend de la fréquence ν du rayonnement électromagnétique incident :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 = h(\nu - \nu_s) \quad \text{avec} \quad \begin{cases} E_c \text{ en J} \\ m = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg la masse de l'électron} \\ v \text{ la vitesse de l'électron en m.s}^{-1} \\ \nu \text{ et } \nu_s \text{ en Hz} \\ h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s} \end{cases}$$

~Application 3 : Stérilisation avec les UV-C

Les UV-C sont les ultraviolets les plus énergétiques et donc les plus nocifs pour le corps humain. Des lampes émettrices d'UV-C sont utilisées dans les laboratoires de biologie pour stériliser le matériel.

Une plaque de zinc est éclairée avec une lampe à UV-C émettant un rayonnement de longueur d'onde $\lambda = 100 \text{ nm}$.

Données

- Constante de Planck : $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$
- Masse d'un électron : $m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$
- $1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$
- Travail d'extraction du zinc : $W_{\text{ext}}(\text{Zn}) = 9,41 \text{ eV}$



- Déterminer la fréquence seuil ν_s du zinc.
- Déterminer la fréquence du rayonnement émis par la lampe à UV-C.
- L'effet photoélectrique est-il observable ?
- Déterminer l'énergie cinétique E_c des électrons éjectés de la plaque de zinc. On donnera le résultat en joules et en électron-volts.
- En déduire leur vitesse v .

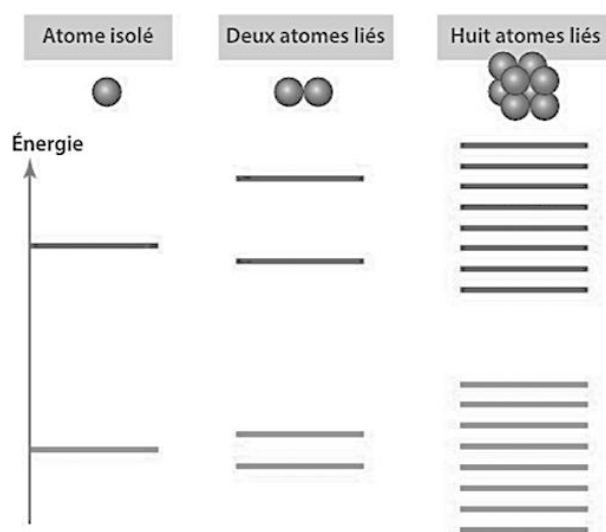
III. exemples d'applications de l'interaction photon-matière

1. Semi-conducteur

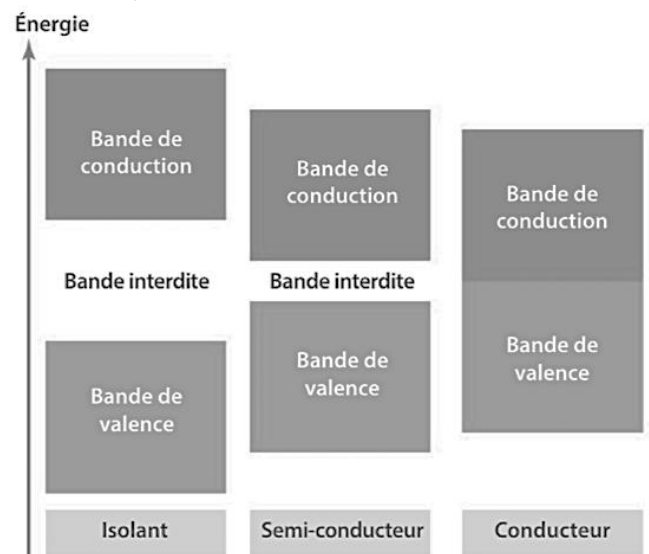
 Regarder le film sur « l'électron libre ; la théorie des bandes »



Lorsqu'un grand nombre d'atomes s'associent pour former un solide, leurs niveaux d'énergie se regroupent en **bandes d'énergie** : la bande de valence, la bande de conduction et la bande



Association d'atomes et états d'énergie correspondants.



Différents types de solides caractérisés par la largeur de leur bande interdite.

interdite.

La **bande de valence** contient les électrons liés aux atomes lorsque le solide est dans son état d'énergie minimale. Ces électrons ne peuvent pas se déplacer librement dans le matériau.

La **bande de conduction** correspond à des niveaux d'énergie plus élevés. Les électrons présents dans cette bande sont mobiles : ils peuvent circuler dans le solide et participer à la conduction du courant électrique.

Pour qu'un électron puisse conduire le courant, il doit passer de la bande de valence à la bande de conduction. Cette transition nécessite un apport d'énergie, qui peut être fourni par exemple par un rayonnement électromagnétique : un photon peut alors transférer son énergie à un électron.

La largeur de la bande interdite permet d'expliquer les propriétés électriques des matériaux :

- si la bande interdite est très grande, le matériau est **isolant** ;
- si elle est nulle, le matériau est **conducteur** ;
- si elle est faible, le matériau est **semi-conducteur**.

Un semi-conducteur peut donc se comporter comme un isolant ou comme un conducteur selon les conditions d'utilisation.

2. Cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est constituée d'un matériau semi-conducteur, comme le silicium.

Lorsque le silicium absorbe l'énergie du rayonnement solaire, certains électrons de la bande de valence reçoivent suffisamment d'énergie pour passer dans la bande de conduction.

Dans cette bande, les électrons deviennent mobiles : ils peuvent circuler dans le matériau et participer à la création d'un courant électrique. Ce phénomène est appelé effet photovoltaïque.



Une cellule photovoltaïque permet ainsi de convertir une partie de l'énergie lumineuse du Soleil en énergie électrique.

Rendement d'une cellule photovoltaïque

Le rendement η d'une cellule photovoltaïque est définie par

$$\eta = \frac{E_{\text{utile}}}{E_{\text{fournie}}} = \frac{P_{\text{électrique}}}{P_{\text{lumineuse}}} \begin{cases} \eta \text{ sans unité} \\ E \text{ en joule (J)} \\ P \text{ en watt (W)} \end{cases} \quad \text{avec}$$

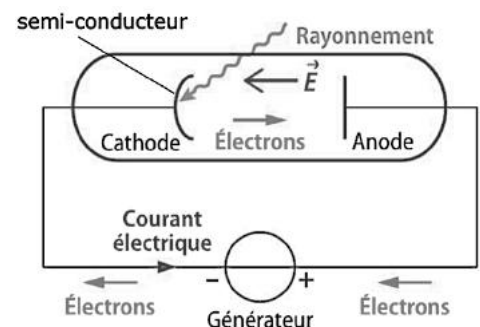
- $P_{\text{électrique}} = (U \times I)_{\text{max}}$ puissance maximale fournie par la cellule, U la tension aux bornes de la cellule photovoltaïque et I le courant débité par la cellule.
- $P_{\text{lumineuse}} = \varepsilon \times S$ avec ε l'éclairement ou l'intensité lumineuse en W.m^{-2} et S la surface de la cellule.

3. Interrupteur photoélectrique

On place un condensateur dans un tube sous vide. La cathode du condensateur est constituée d'un matériau semi-conducteur. Ce dispositif est intégré dans un circuit électrique contenant un générateur.

Lorsque la cathode est éclairée, un courant électrique apparaît dans le circuit. En absence d'éclairement, le courant est nul.

Le rayonnement lumineux agit donc comme un interrupteur commandant le passage du courant électrique.



4. Diodes électroluminescentes (DEL)

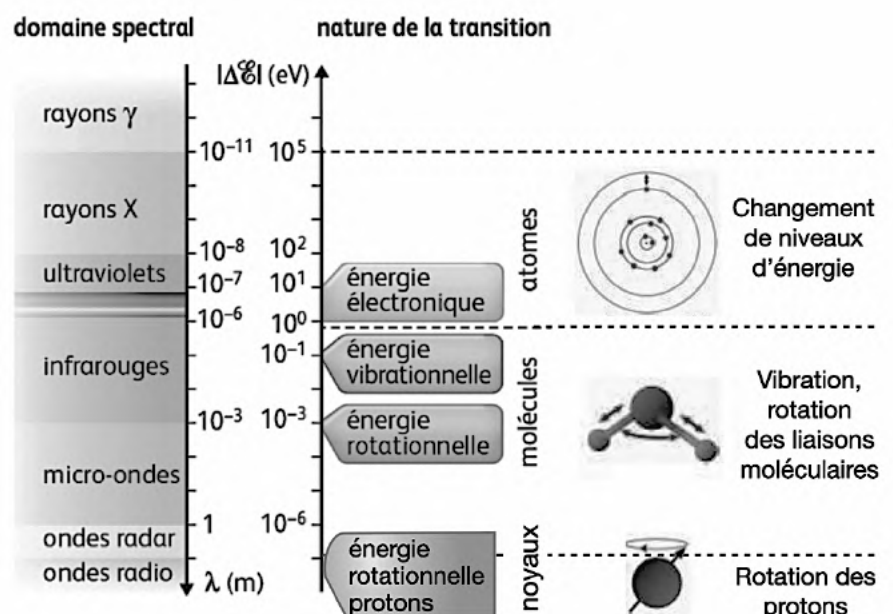
Le phénomène inverse de l'effet photovoltaïque est l'électroluminescence.

Dans une diode électroluminescente (DEL), l'énergie électrique est convertie en énergie lumineuse.

Lorsqu'un électron passe de la bande de conduction à la bande de valence, il perd de l'énergie. Cette énergie est émise sous forme d'un photon.

5. Spectroscopies

L'énergie du rayonnement absorbé par la matière peut être transformée en énergie cinétique ou en énergie potentielle, selon la longueur d'onde du rayonnement incident.



Plan de travail

QCM : <http://www.hatier-clic.fr/pct519>

Exigences et capacités exigibles du Chapitre 15 : Interaction Lumière-matière	Exercices Applications et TP	Exercices Hatier
Décrire l'effet photoélectrique et connaître ses caractéristiques. Savoir l'interpréter avec le modèle particulaire de la lumière.	Application 1, 2	29, 31 p.524 36 et 38 p.525 49 p.529
Faire un bilan d'énergie et en déduire la relation entre l'énergie cinétique d'un photon et sa fréquence.	Application 2	23 p.520 (corrigé) 38 et 40 p.525 45 p.527
Expliquer qualitativement le fonctionnement d'une cellule photoélectrique et citer des exemples d'applications de l'interaction photon-matière.	Bilan	25 p.521 35 p.524 38 et 40 p.525 45 p.527 49 p.529
Déterminer le rendement d'une cellule photovoltaïque	TP Exercice	24 p.521 (corrigé) 43 p.526 50 p.530

Exercice : les cellules photovoltaïques multijonctions*Bac 2017 Nouvelle Calédonie*

La plupart des panneaux solaires présents dans notre environnement sont composés de cellules constituées d'un matériau semi-conducteur, généralement le silicium (80% du marché).

Cependant, d'autres filières de production se développent, parmi lesquelles la filière de cellules multi-jonctions utilisées en particulier dans le domaine aérospatial (alimentation électrique de satellites). Ces cellules sont constituées de couches successives de matériaux semi-conducteurs différents, principalement des alliages dérivés de l'arséniure de gallium (GaAs).

L'objectif de l'exercice est de comprendre l'intérêt des cellules multi-jonctions par rapport aux cellules au silicium en exploitant les documents fournis et vos connaissances.

Données :

- constante de Planck : $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$;
- $1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$;
- la valeur de la célérité de la lumière dans le vide est supposée connue par le candidat.

Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Pour convertir l'énergie des photons en énergie électrique, on utilise des cellules solaires constituées de semi-conducteurs. Ces matériaux sont caractérisés par une bande d'énergie interdite nommée « gap ». La valeur de ce gap dépend de la nature chimique et de la structure du matériau, sa valeur est de 1,1 eV pour le silicium monocristallin.

Un photon est absorbé par un semi-conducteur quand son énergie est supérieure au gap, sinon il le traverse ; ainsi, tous les photons d'énergie supérieure au gap peuvent être absorbés. Cependant, l'énergie en excès est vite perdue sous forme de chaleur et l'énergie électrique maximale que l'on peut espérer récupérer est égale à celle du gap.

D'après Pour la Science, juillet 2010, « Des électrons contre du Soleil » de J. M. Courty et E. Kierlik et Pour la Science, octobre 2010, « L'électricité, fille du Soleil » de D. Lincot et al

Rendement d'une cellule photovoltaïque

Le rendement d'une cellule photovoltaïque est défini par la relation suivante :

$$r = \frac{\text{puissance électrique maximale délivrée par cellule}}{\text{puissance lumineuse reçue par cellule}}$$

Caractéristiques de la cellule solaire en silicium monocristallin commercialisée par Microsol

- surface $S = 2,43 \times 10^{-2} \text{ m}^2$;
- caractéristiques électriques réalisées sous des conditions de test standardisées, à 25°C, avec un ensoleillement de 1000 W.m^{-2} :

Paramètre	Symbole	Valeur typique
Tension en circuit ouvert	V_{oc}	0,614 V
Intensité de court-circuit	I_{sc}	8,594 A
Tension à puissance maximale	$V_{P_{max}}$	0,521 V
Intensité à puissance maximale	$I_{P_{max}}$	8,090 A
Puissance maximale	P_{max}	4,210 W

D'après www.microsolinternational.com

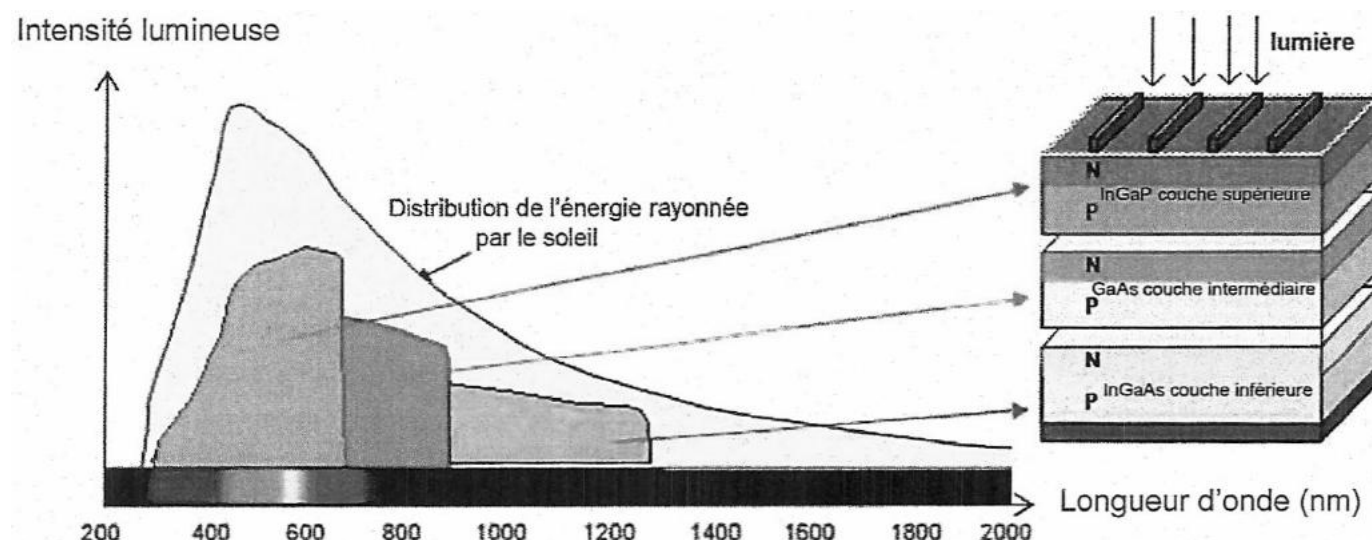
La cellule triple jonction mise au point par Sharp en novembre 2011

Le record mondial de rendement pour des cellules photovoltaïques sans concentrateur de lumière a été battu par Sharp, le premier fabricant japonais de cellules photovoltaïques.

Cette avancée a été rendue possible grâce à la structure en trois couches de la cellule photovoltaïque, constituée de trois semi-conducteurs de gaps différents : la couche supérieure en phosphore d'indium-gallium InGaP de gap 1,8 eV, une deuxième couche en arséniure de gallium GaAs de gap 1,4 eV, puis une couche inférieure en arséniure d'indium-gallium InGaAs de gap 1,0 eV.

Cet empilement de jonctions selon des gaps décroissants permet d'atteindre une efficacité de conversion nettement plus importante que pour les cellules au silicium monocristallin.

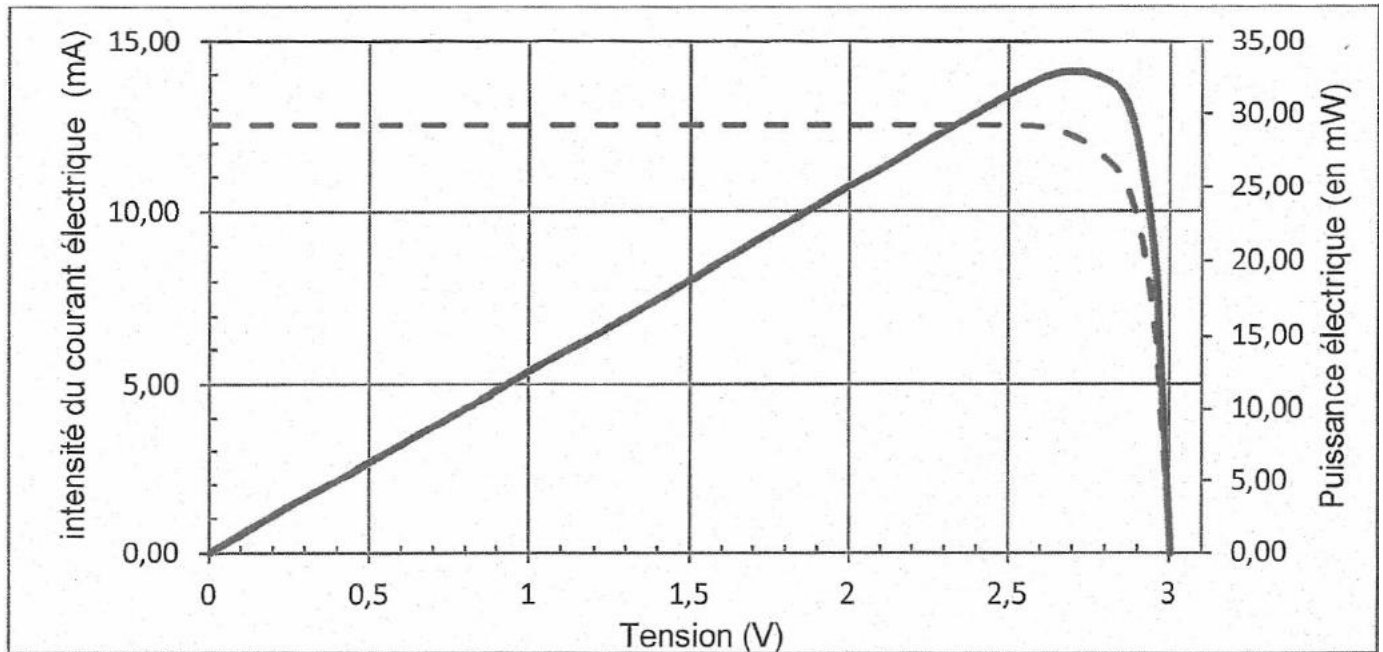
Distribution en longueur d'onde de l'énergie rayonnée par le Soleil et sensibilité en longueur d'onde de la cellule triple jonction



D'après www.bulletins-electroniques.com et www.photovoltaique-couche-mince.com

Caractéristique intensité-tension de la cellule triple-jonction de Sharp de surface

$S = 8,9 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ avec un ensoleillement de 1000 W.m^{-2} :



Courbe en pointillés : évolution de l'intensité du courant électrique.

Courbe en trait épais : évolution de la puissance électrique délivrée.

(d'après l'article de M. A. Green et al. « Solar cell efficiency tables (version 39) », *Progress in Photovoltaics Research and Applications*, 2012)

Questions

1. Calculer les rendements des cellules triple-jonction de Sharp et Microsol au Silicium.

Afin de comprendre pourquoi le rendement de la cellule triple jonction est meilleur que celui de la cellule Microsol au Silicium, on s'intéresse à deux photons de longueurs d'onde respectives

$\lambda_1 = 1,0 \mu\text{m}$ et $\lambda_2 = 0,65 \mu\text{m}$.

2. Déterminer l'énergie de chacun des deux photons considérés.

Ces deux photons arrivent dans un premier cas sur un semi-conducteur en silicium monocristallin et dans un second cas sur une couche de semi-conducteur en phosphore d'indium gallium InGaP.

On considère pour simplifier, que chaque photon qui a l'énergie nécessaire pour être absorbé par un semi-conducteur l'est effectivement.

3. Les deux photons arrivent sur la cellule solaire en silicium monocristallin.

Déterminer l'énergie électrique maximale récupérée.

4. Ces deux photons arrivent maintenant sur la cellule triple-jonction de Sharp.

Indiquer par quelle couche de la cellule chaque photon sera absorbé et déterminer l'énergie maximale récupérée. Conclure.

5. Expliquer en quoi la constitution et l'ordre des couches de la cellule Sharp triple-jonction lui confèrent une meilleure performance que la cellule au Silicium Microsol lorsqu'elles sont éclairées par la lumière du Soleil.