

# Nature corpusculaire de la lumière, l'effet photoélectrique

source : <http://www.pensifs.com/sciences/divers/energie-solaire-effet-photoelectrique.php>

## 1. Définition

On appelle effet photoélectrique, l'**extraction d'électrons de la matière par un rayonnement électromagnétique**.

Qui dit extraction d'électrons, dit **production d'un courant électrique**.

Un cas particulier en est la production d'énergie photovoltaïque à partir de l'énergie solaire. En effet, l'énergie solaire est lumineuse, donc électromagnétique. Les capteurs photovoltaïques sont des matières aptes à subir un effet photoélectrique.

## 2. Mécanisme atomique

**L'inverse du mécanisme de luminescence est possible**: on peut imaginer de créer de l'électricité grâce à la lumière, par exemple celle de l'énergie solaire. **Le passage d'un électron à un état excité est un moyen de libérer cet électron et de générer ainsi de l'électricité**.

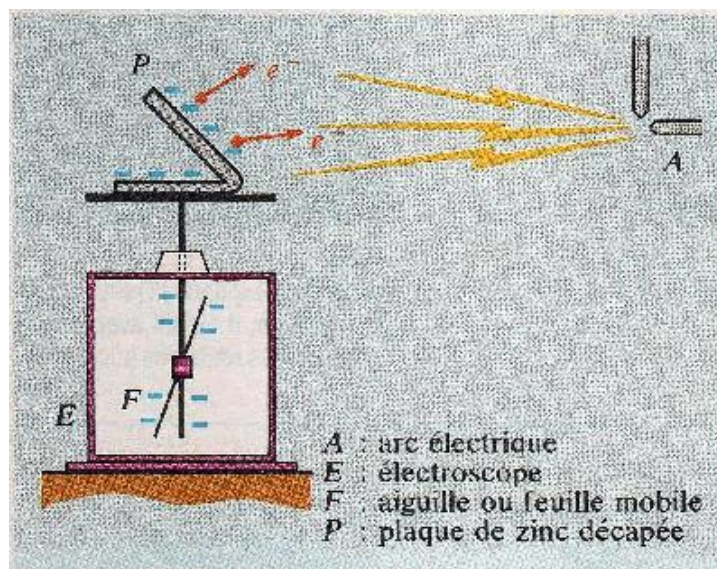
Le problème est que **le choc doit être assez intense pour permettre l'éjection d'un électron**.

Or les photons les plus énergiques, ceux *ultra-violets*, sont filtrés par la couche d'ozone.

## 3. Découverte de l'effet photoélectrique

L'effet photoélectrique fut découvert dès 1887, par Hertz. *Les unités de fréquence sont en hertz: un hertz vaut une oscillation par seconde*.

Son dispositif était composé d'une plaque métallique reliée à un électroscope, ayant pour rôle de signaler le passage d'un courant électrique. La plaque métallique était en zinc. Le faisceau lumineux résultait d'un arc électrique.



L'arc électrique est riche en rayonnement ultraviolets et c'est ce qui permet, dans ce cas ci, l'effet photoélectrique. On constate en effet que si on place une lame de verre entre l'arc électrique et la plaque de zinc, l'effet photoélectrique ne fonctionne plus; or le verre est précisément la particularité d'arrêter les

ultraviolets. Par contre, si au lieu de la lame de verre on place une lame de quartz, l'effet photoélectrique fonctionne; or le quartz laisse passer les ultraviolets. Voir l'animation proposée: « Expérience de Hertz ».

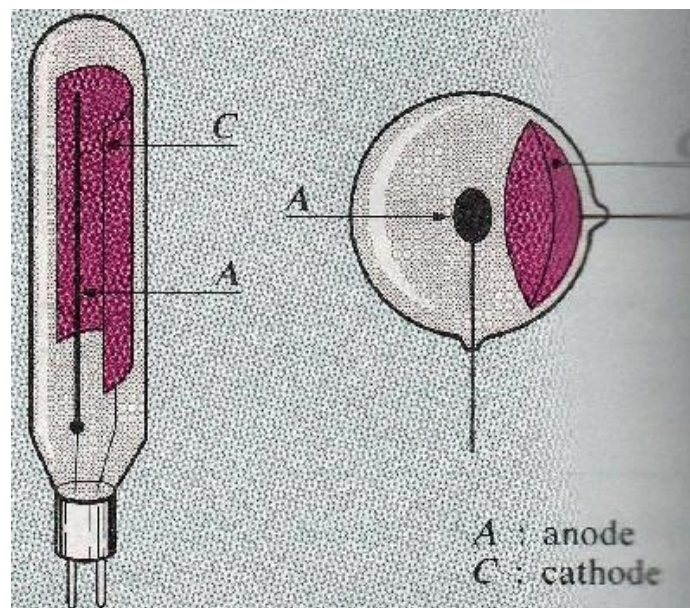
## 4. Observations et découverte des photon

### 4.1 Dispositif complet

Pour des expériences plus détaillées, il convient de placer le métal dans le vide. On a donc fabriqué alors des cellules dites photo-émisives à l'aide d'un verre particulier, transparent aux ultraviolets et assez épais pour résister à la pression atmosphérique. Dans cet environnement confiné, on place une plaque métallique à l'intérieur de laquelle on situe une tige métallique. On le appelle respectivement cathode, car la plaque métallique sera une source d'électrons, et anode car la tige, de charge positive, attirera ces électrons et les évacuera.

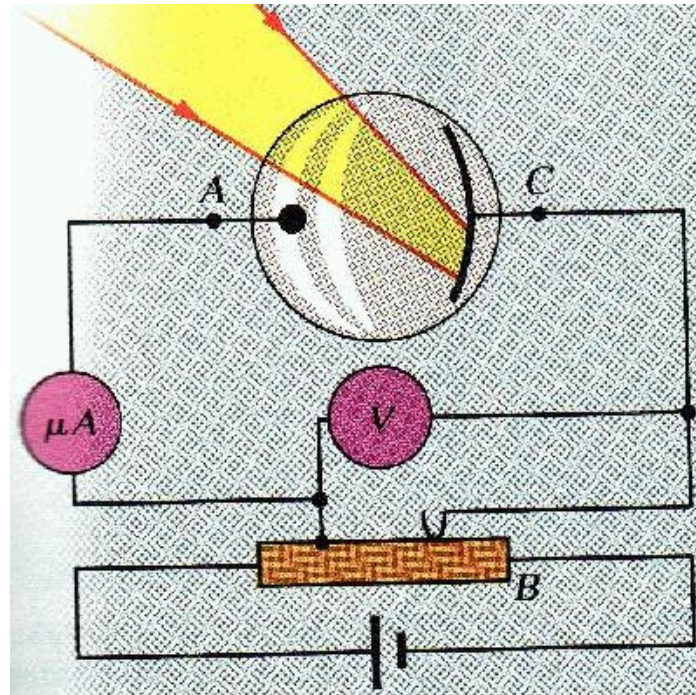
*Les cations, qu'on enseigne en chimie, sont positifs mais les cathodes sont négatives. Inversement, les anions sont négatifs et les anodes positives.*

On voit ci-dessous deux dispositifs possibles, dont celui à droite montre plus clairement l'absence de lien physique entre cathode et anode. Les électrons circuleront dans le vide, projetés par le choc des photons sur la cathode, et seront évacués par l'anode.



Il se crée automatiquement, lorsqu'un effet photoélectrique intervient, une différence de tension entre A et C puisque la cathode est une source de charges négatives. Cette tension  $U_{AC}$  est mesurée mais elle peut aussi être entretenue artificiellement afin d'observer son influence sur l'effet photoélectrique. Dans le dispositif figuré ci-dessous, V est le voltmètre qui mesure  $U_{AC}$  et B est un potentiomètre qui peut déterminer  $U_{AC}$  en lui donnant une charge, négative ou positive. A gauche figure le microampèremètre. Il mesure le courant I.

*Pour une bonne compréhension de ce système, il faut tenir compte de ce que le courant ne consiste pas uniquement en un flux d'électrons à partir de l'anode vers le reste du système, mais également, en une arrivée permanente d'électrons au niveau de la cathode. C'est l'entretien de ce courant, et non le dégagement d'électrons, qui est le but recherché.*

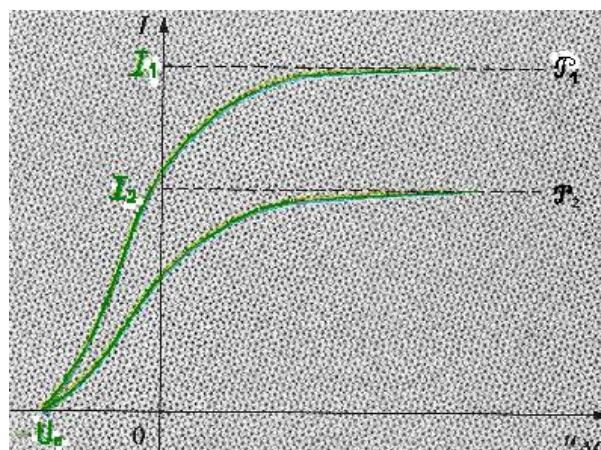


La valeur  $U_{AC}$  due à l'effet photoélectrique est positive: l'anode A a une charge positive, forcément plus élevée que celle de la cathode C puisque celle-ci produit des électrons *qui, pour rappel, sont de charge négative*.

## 4.2 Maximisation de l'intensité du courant photoélectrique

Chaque électron parvenu à l'anode va alimenter un courant, dont l'intensité est donc proportionnelle au nombre d'électrons qui ont pu atteindre l'anode.

L'intensité du courant créé par effet photoélectrique, pour un métal donné, est proportionnelle à la puissance du faisceau lumineux et peut être favorisée par l'entretien d'une tension  $U_{AC}$  positive. On voit cependant dans la figure ci-dessous qu'on atteint un plateau à partir duquel il est inutile d'accroître encore  $U_{AC}$ .



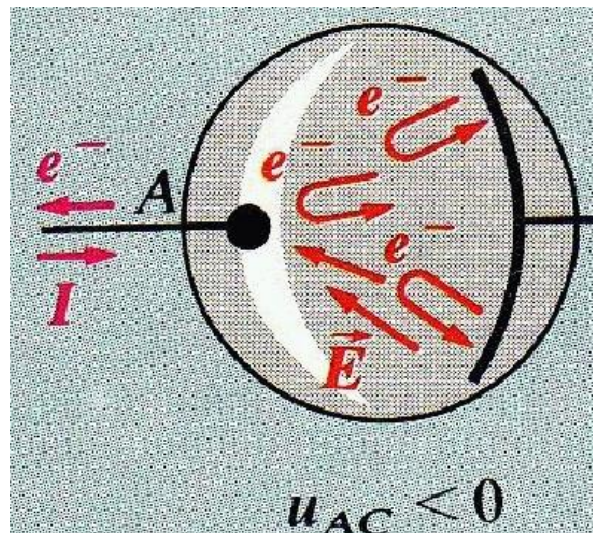
Voici ce qui explique ce plateau:

- la quantité d'électrons arrachés à la cathode est toujours la même, quel que soit  $U_{AC}$ ;
- la différence entre le niveau d'intensité maximale,  $I_s$ , et celui constaté, tient en la quantité d'électrons de faible énergie qui ne parvient pas à l'anode, *même si* celle-ci est plus positive que la cathode, et qui revient à la cathode;
- le plateau est atteint lorsque ce réservoir d'électrons de faible énergie, qui ne sont pas assez attirés par l'anode, est épuisé.

### 4.3 Notion de potentiel d'arrêt

A gauche de cette même figure, on voit que si on rend  $U_{AC}$  négative, le courant diminue et il sera annulé en-dessous d'une certaine valeur négative de  $U_{AC}$ , quelle que soit la puissance du faisceau lumineux.

Le motif en est que **les électrons sont freinés** par la valeur négative de  $U_{AC}$ , ce qui diminue le nombre d'entre eux qui parviendront à l'anode. En effet, comme on le voit ci-dessous, **si on inflige à notre dispositif une différence de potentiel  $U_{AC}$  négative, une partie au moins des électrons partis de la cathode auront tendance à y retourner** et cette partie est d'autant plus forte que le potentiel  $U_{AC}$  négatif, qui est maintenu artificiellement, est fortement marqué.



Notons dans ce schéma que le sens dans lequel circule  $I$  est inverse de celui des électrons. Le motif en est qu'à l'époque où a été décidée la convention sur le sens de circulation du courant, on ignorait à la fois que le courant électrique consiste en un flux d'électrons et que ce flux va en sens inverse. La convention du signe négatif des électrons est entrée en adéquation avec cette situation, selon laquelle le courant électrique coule d'un endroit à potentiel positif vers un endroit à potentiel négatif. En l'occurrence, ici, il coule de l'anode à la cathode, comme si le courant consistait en des charges positives que l'anode envoie à la cathode. Dès lors, L'arrivée d'électrons sur la cathode marque sans ambiguïté la diminution du courant électrique.

On appelle potentiel d'arrêt la valeur  $U_{AC}$  sous laquelle *aucun* courant ne passe plus.

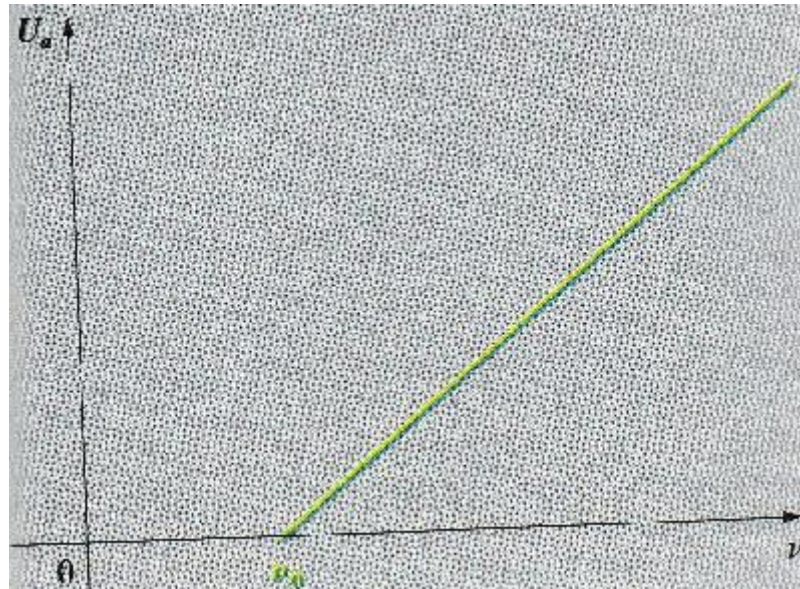
### 4.4 Intérêt du potentiel d'arrêt

Ce sont les électrons les plus énergiquement chassés de la cathode qui atteindront l'anode. Indirectement, donc, le suivi de l'influence de  $U_{AC}$  donne une idée de l'énergie maximale acquise par les électrons.

**Le potentiel d'arrêt dépend de la fréquence.** Si la fréquence du rayonnement est accrue, on constate un glissement de la courbe vers la gauche. Ceci signale que les électrons arrachés à la matière sont, alors,

expulsés à une plus grande vitesse et que celle-ci, en leur donnant une certaine énergie cinétique (pour la vitesse  $v$  :  $m \cdot v^2/2$ ) leur permet de vaincre le freinage dû au potentiel d'arrêt.

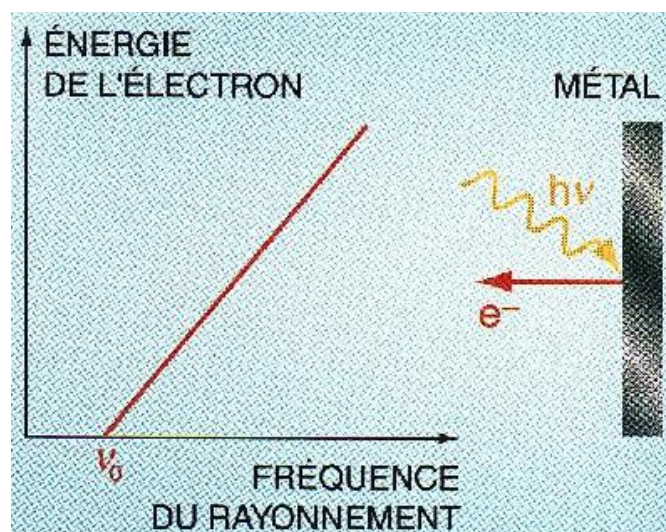
Une relation existe entre le potentiel d'arrêt et la vitesse maximale. Elle permet de calculer des vitesses maximales, lors de l'arrachage, qui sont de l'ordre de quelques centaines de kilomètres par seconde. Cette relation est strictement proportionnelle. C'est pourquoi, dans la courbe ci-dessous, le potentiel d'arrêt peut être considéré comme l'expression directe de l'énergie cinétique maximale des électrons émis par la cathode. On voit qu'elle ne dépend que de la fréquence de la radiation monochromatique (d'une seule couleur) et qu'elle croît de façon proportionnelle à cette fréquence, à partir d'une valeur seuil.



Pour tous les métaux, l'inclinaison de cette droite est la même. La seule différence, d'un métal à un autre, tient dans la fréquence seuil.

#### 4.5 Une théorie s'impose: les photons

La figure ci-dessous dit exactement la même chose que celle précédente, mais en d'autres termes:



C'est bien la fréquence qui compte. L'énergie des électrons qui sont émis ne dépend pas de l'intensité du rayonnement mais uniquement de sa fréquence. Pourtant, *en vertu de la théorie ondulatoire, on pourrait se dire que c'est la puissance du rayonnement qui va déterminer l'énergie des électrons !*

D'où l'idée suivante, qui a valu à Albert Einstein le prix Nobel:

- pour arracher un électron à un atome, il faut une certaine quantité d'énergie;
- seuls les photons porteurs de cette énergie, c'est-à-dire de fréquence suffisamment forte, peuvent donc avoir un effet photoélectrique;
- si la fréquence est supérieure, l'énergie avec laquelle est dégagé l'électron vaut la différence entre l'énergie fournie par le photon et la quantité d'énergie nécessaire pour arracher l'électron.

*Einstein ne parlait au départ que de quanta (pluriel de quantum) de lumière. Il était extrêmement prudent et n'aurait pas osé émettre d'emblée la notion de photon (qui a d'ailleurs été inventée par une autre personne, beaucoup plus tard). En effet, ç'aurait semblé un démenti de la théorie ondulatoire qui est largement corroborée par tous les phénomènes optiques. Il aurait été ainsi associé à ceux qui, jusqu'à la moitié du 19ème siècle, avaient affirmé que la lumière est formée de particules matérielles. C'est donc en des termes très mesurés qu'il présentait son idée sur la nature de la lumière:*

**(...) constituée d'un nombre infini de quanta d'énergie localisés en des points de l'espace, qui se déplacent sans se dissocier et qui ne peuvent être absorbés et produits que d'un coup.**

## 5. Interprétation : équation de conservation de l'énergie (Einstein 1905)

L'effet photoélectrique est une interaction photon-électron

Energie du photon incident = énergie d'extraction de l'électron + énergie cinétique éventuelle communiquée à l'électron

$$h \cdot \nu = W_0 + E_{co}$$

$E_{co} = q \cdot U_{AC}$  ( $q < 0$  et  $U_{AC} < 0$  car cette tension est antagoniste, elle permet de stopper les électrons avant qu'ils arrivent sur l'anode.)

$W_0 = h \cdot \nu_0$  ;  $\nu_0$  est la fréquence à partir de laquelle l'extraction de l'électron se produit (fréquence seuil).

L'équation s'écrit donc :

$$h \cdot \nu = h \cdot \nu_0 + q U_{AC}$$

$$U_{AC} = \frac{h}{q} (\nu - \nu_0)$$

La pente de la courbe ci-dessus dépend uniquement de la constante universelle  $h$  dite constante de Planck, qui permet de calculer l'énergie d'un photon par multiplication de sa fréquence:

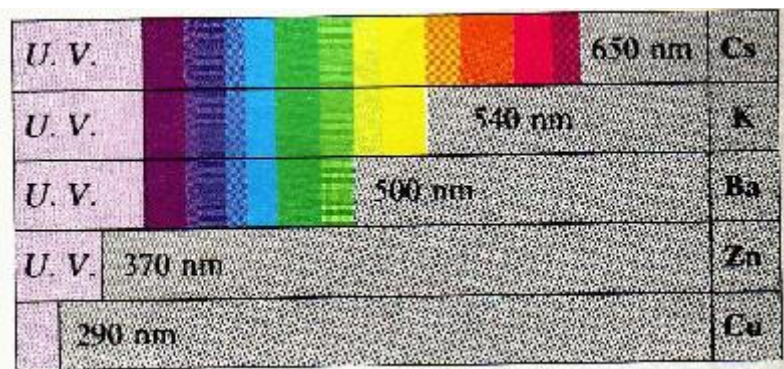
Pour construire cette courbe, voir Effet photoélectrique;(animation)

La valeur de  $h$  est la constante de Planck par laquelle il faut multiplier une fréquence pour obtenir l'énergie d'un photon. La lettre  $\nu$  est en fait un caractère grec 'nu'. Ainsi, ' $\nu_0$ ' ( $\nu_0$ ) est la fréquence qui constitue le seuil, sous lequel l'effet photoélectrique

## 6. Variation chimique de la fréquence seuil

Le zinc ne réagit qu'aux ultraviolets. Son seuil est précisément à une longueur d'onde de 370 nm. Quant au Cuivre, il est encore plus restrictif: les ultraviolets ne doivent pas dépasser une longueur d'onde de 290 nm.

Par contre, des substances alcalines et alcalino-terreuses (à gauche du tableau de Mendéléev), telles que le Barium (Ba), le Potassium (K) et le Césium (Cs), admettent une partie des rayonnements du visible. *On sait, en chimie, que ces éléments s'ionisent facilement en perdant leurs électrons périphériques.*



En reprenant la formule précédemment exposée, on constate que le Césium nécessite deux fois moins d'énergie que le Zinc pour laisser partir un de ses électrons.

Parmi les cathodes les plus utilisées, on se sert effectivement d'un composé base de Césium et d'Antimoine: le  $SbCs_3$  qui est sensible à tout rayon de lumière de longueur d'onde inférieure à 650 nm.

## 7. Interprétation des lois de Lenard

Einstein a brillé par (selon son expression) son *point de vue heuristique*, c'est-à-dire par ses déductions, mais c'est Lenard qui a fait l'étude systématique de l'effet photoélectrique et qui en a déduit quelques lois. Nous allons en donner l'interprétation.

*Ce sera en bonne partie redondant par rapport à ce qui a été dit précédemment, mais nous le formulerons autrement et par la même occasion ça servira de résumé.*

### 7.1 1ère loi

L'effet photoélectrique ne se produit qu'avec un rayonnement de fréquence supérieure ou égale à la fréquence seuil.

Une multitude de photons cumuleraient en vain leurs énergies ! Ils ne parviendront jamais à l'effet qui est obtenu par un photon dont l'énergie est suffisante.

### 7.2 2ème loi

L'intensité du courant de saturation (courant maximal)  $I_s$  est proportionnelle à la puissance du faisceau incident.

Si on admet que parmi un rayon lumineux donné une certaine proportion des photons, appelée rendement quantique, possède l'énergie nécessaire, on en déduit immédiatement que la quantité de photons aptes à donner un effet photoélectrique est proportionnelle, d'une part à ce rendement quantique, qui est constant, et d'autre part à la puissance du faisceau incident, c'est-à-dire, à la quantité de photons qui arrivent à la cathode.

Si plus de photons ont l'effet photoélectrique, plus d'électrons sont arrachés: l'intensité du courant est dès lors accrue.

### 7.3 3ème loi

La tension d'arrêt  $U_{AC}$  est fonction affine de la fréquence du rayonnement incident.

La notion de fonction désigne ici une relation particulière entre deux axes, celui horizontal étant le paramètre et celui vertical étant l'objet de mesures. Cette relation particulière, si elle est *affine*, est une droite qui prend son départ sur la ligne horizontale à un point qui se trouve dans les valeurs positives du paramètre qui, en l'occurrence, est la fréquence du rayonnement incident.

L'électron qui se trouve arraché a acquis une énergie cinétique (de formule  $m * v * v / 2$ ) qui équivaut à l'énergie qu'avait le photon qui l'a arraché *moins* l'énergie correspondant au seuil nécessaire pour arracher l'électron.

## 8. Applications de l'effet photoélectrique

D'innombrables applications de l'effet photoélectrique ont été faites.

Les plus usuelles consistent en l'activation à distance de dispositifs mécaniques, tels que les portes de garage.

Des usages plus sophistiqués existent. Dans le cinéma parlant, des pistes sonores accompagnent le film. Le son est produit (ensuite, il est amplifié) par la quantité d'énergie électrique dégagé lors du passage du faisceau lumineux à travers ces pistes sonores.

## 9. Photopiles

### 9.1 Insuffisance des cellules photo-émisives

L'application qui nous intéresse le plus, car elle est d'ici l'objet de nos études, est la production d'énergie électrique à partir de l'énergie solaire.

En réalité, ce problème n'est pas simple. **Les cellules photo-émisives telles qu'elles ont été décrites dans cette page produisent des courants très faibles, de l'ordre du microampère**, c'est-à-dire, d'un millionième d'ampère. Il est possible de les amplifier en plaçant un gaz inerte tel que l'argon (qui constitue près de 1% de l'atmosphère) mais le rendement du système est complexe. Les courants produits ne sont plus proportionnels aux puissances des faisceaux incidents.

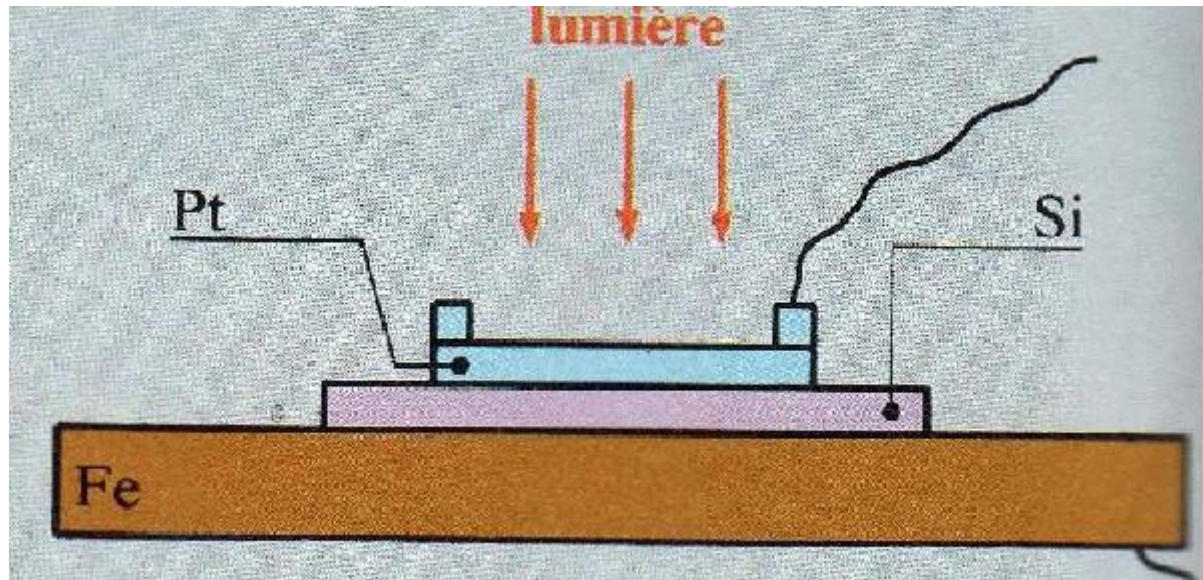
C'est pourquoi **les cellules photovoltaïques ne sont pas des cellules photo-émisives mais des photopiles.**



## 9.2 Principe des photopiles

Les photopiles mobilisent l'effet photoélectrique mais les électrons ne doivent pas circuler jusqu'à une anode. Ils sont évacués, à l'aide d'une pile, c'est-à-dire suite à la différence électrique qui existe spontanément entre certains matériaux.

La figure ci-dessous montre un empilement habituel de trois éléments, dont deux métalliques, qui enserrant un élément dit semi-conducteur.



On a au fond, une plaque de fer (Fe), qui évacue les électrons, et tout au-dessus une mince couche transparente de Platine (Pt). Ces deux métaux ont un effet similaire à celui qu'aurait, dans une solution aqueuse salée, la présence d'un tube de zinc et d'un autre en cuivre. Dans ce cas-ci, c'est entre le Fer et le Platine qu'existe un potentiel.

L'usage des photopiles est très simple. Les besoins en énergie électrique, couverts par l'énergie solaire, seront proportionnels à la surface des panneaux solaires et l'intensité du courant produit, sous forme de **courant continu**, dépendra de la puissance solaire reçue.

A moins de disposer d'un circuit adapté au courant continu, il faudra se servir d'un **onduleur** pour transformer le courant continu en courant alternatif.

L'intensité du courant produit est de l'ordre de 300 Ampères par mètre carré.

Pour améliorer le rendement, c'est-à-dire l'intensité de courant créé par surface de photopile, des procédés chimiques sophistiqués sont mis à l'œuvre. A la limite, le silicium peut à lui constituer une photopile. Alors que le silicium a 4 électrons à disposition pour ses liaisons avec les atomes de silicium environnants, certains atomes ont 5 ou 3 électrons à disposition (dans l'orbite électronique externe). Par exemple les atomes de phosphore (symbole P) sont dits de type N comme négatifs car si on remplace un atome Si par

un atome P il y a un électron libre, auquel ne correspond aucune charge positive. Si au contraire on remplace un atome Si par un atome de Bore (B) ceci crée un déficit en électrons puisque cet atome n'a que trois électrons à partager avec les quatre atomes de Si environnants.

Dans une couche de Si où **des impuretés négatives sont présentes d'un côté et des impuretés positives de l'autre côté**, les électrons qui sont en excès du côté N (négatif) sont tentés de transiter vers le côté P (positif). Ce transit est favorisé par l'intervention des photons.

Il doit être alimenté en permanence par un courant électrique. Or l'objectif est précisément la création de ce courant électrique.

L'efficacité de ces procédés est réelle mais elle est particulièrement délicate à mettre en oeuvre. Une bonne part des photons continue de traverser le dispositif sans aucune autre conséquence que son réchauffement. Celui-ci diminue le rendement et risque d'abîmer l'ensemble du système.

### 9.3 Diversité des solutions

Le rendement des photopiles s'accroît au fur et à mesure que de nouveaux assemblages chimiques et que de nouveaux types de préparation des matières sont découverts.

A l'heure actuelle, les cellules photovoltaïques sont généralement des pastilles de silicium, dont la production est relativement onéreuse. Ce n'est cependant pas une matière première onéreuse. Près de la moitié de la matière des roches de la croûte terrestre est constituée d'atomes de silicium, qu'on retrouve aussi bien dans le sable que dans les argiles. Ce sont les divers traitements nécessaires qui rendent chères les pastilles de silicium.

Leur épaisseur est de l'ordre d'un cinquième de millimètre, soit 200 microns.

On distingue d'ailleurs plusieurs formes de préparation du silicium: cristallin, monocristallin, poly ou multicristallin ou amorphe hydrogéné. Mais nous n'avons pas jusqu'à présent de documentation suffisamment précise sur ces types de préparations. *A suivre ...*

#### ***Nous tenterons aussi d'en savoir plus sur d'autres constituants:***

- CdTe, tellure de cadmium, qui serait actuellement en cours de lancement à Rudisleben en Allemagne et dont la particularité est d'être très bien adapté à la formation de couches ultra-minces;
- GaAs, arséniure de gallium, qui serait réservé en raison de son prix à la haute technologie et notamment aux satellites, navettes spatiales etc.
- CIS: mélange complexe entre disilénure de cuivre, disilénure d'indium, sulfure de cadmium, avec lequel on peut former des couches de moins d'un micron;
- TiO<sub>2</sub>, substance présente naturellement dans les sols, nommée aussi rutile; les pastilles composées de cette matière portent le nom de cellules Graetzel.