

## J7. Photovoltaïsme : énergie solaire

Travaux pratiques de physique

École Polytechnique Fédérale de Lausanne

### 1 Introduction

Le soleil est une source d'énergie pratiquement inépuisable. La plus grande partie de l'énergie utilisée par l'Homme jusqu'à présent a son origine dans le soleil (charbon, pétrole, etc.). L'apport solaire directe peut atteindre jusqu'à  $1000 \text{ W/m}^2$  à la surface de la Terre et peut être utilisé soit indirectement en exploitant l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, la biomasse, etc., soit directement en utilisant les effets photothermique et photovoltaïque.

#### 1.1 L'effet voltaïque

Un capteur photovoltaïque est en général composé de deux couches de semi-conducteurs dopés, formant une jonction semi-conductrice pn (diode) étendue. Les photons pénétrant dans cette jonction sont absorbés et une part de leur énergie sert à créer des charges électriques libres (paires électron négatif - "trou" positif). Sous l'effet du champ électrique régnant dans la jonction pn, les deux types de charges créées sont séparées et se répartissent, suivant leur polarité, de part et d'autre de la jonction. À l'aide de deux électrodes conductrices déposées de part et d'autre de la jonction, ces charges peuvent être collectées, de sorte à générer un courant électrique dans un circuit extérieur.

La représentation schématique d'une jonction semi-conductrice (diode) est donnée à la Figure 1. Dans un tel dispositif, le courant direct  $I_D$  est relié à la tension électrique directe  $U_D$  qui lui est appliquée par la relation simplifiée suivante :

$$I_D = I_{SO} \left[ e^{\alpha \frac{U_D}{T}} - 1 \right] - I_\gamma$$

où  $\alpha$  est une constante,  $T$  la température de la jonction en kelvins,  $I_{SO}$  le courant de saturation inverse de la jonction et  $I_\gamma$  le courant photovoltaïque.

Lorsqu'une jonction semi-conductrice est soumise à un éclairage, il apparaît un courant photovoltaïque inverse  $I_\gamma$  supplémentaire, proportionnel à l'intensité lumineuse qui tombe sur la jonction et dû à la création des paires libres électron - "trou" à la jonction lors de l'absorption des photons incidents. Des courbes  $I_D(U_D)$  typiques d'une jonction pn éclairée ou non sont représentées sur la Figure 2.

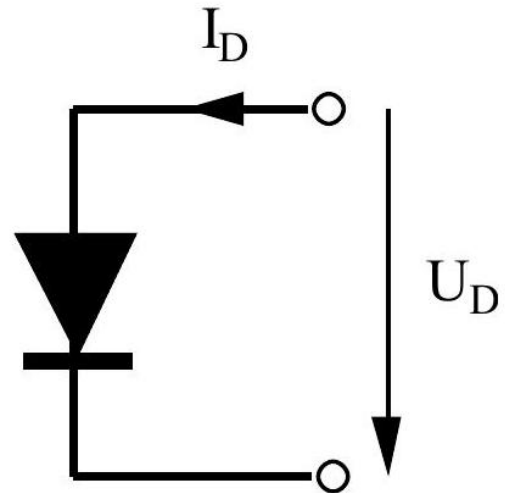


FIGURE 1 – Schéma d'une diode.

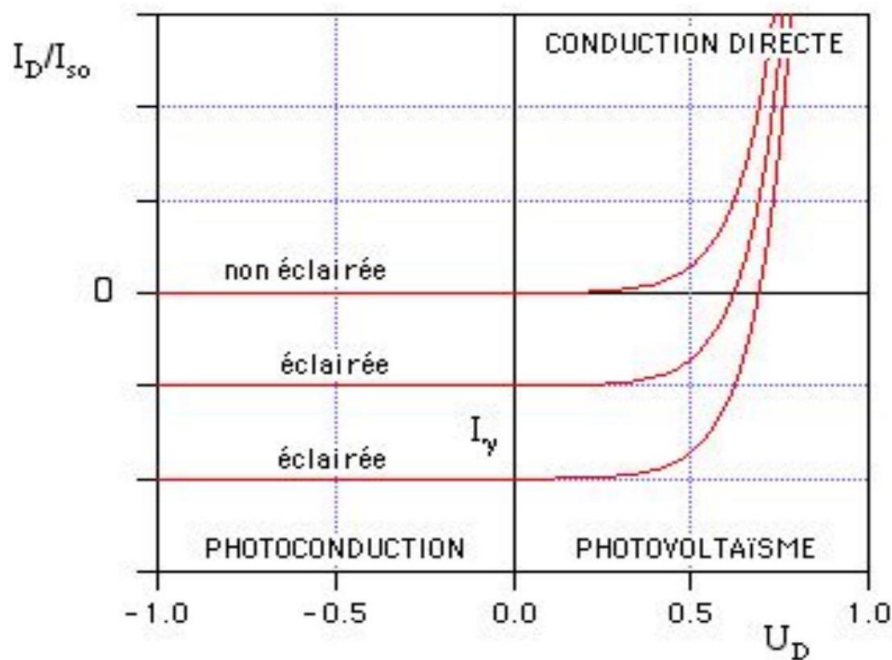


FIGURE 2 – Courbe de fonctionnement d'une diode photoélectrique.

Dans ce diagramme, on observe trois domaines caractéristiques :

- le domaine de la conduction directe, dans lequel la jonction se comporte comme une résistance électrique fortement non linéaire (caractéristique de la diode semi-conductrice)
- le domaine du photovoltaïsme, dans lequel la jonction se comporte comme un générateur électrique
- le domaine de la photoconduction, dans lequel la jonction se comporte comme un régulateur de courant piloté par l'intensité lumineuse incidente.

Dans le domaine du photovoltaïsme, la jonction est appelée cellule photovoltaïque ou générateur solaire. Le circuit électrique le plus simple est alors celui représenté à la Figure 3, dans lequel on connecte la cellule photovoltaïque à une résistance électrique de charge  $R_C$ . Le point de fonctionnement d'un circuit composé d'une cellule photovoltaïque et d'une charge  $R_C$  alimentée par celle-ci est donné par l'intersection de la caractéristique de courant inverse de la diode  $I_R = I_R(U_D)$  avec la droite de charge  $U_D = R_C I_R$  (voir Figure 4).

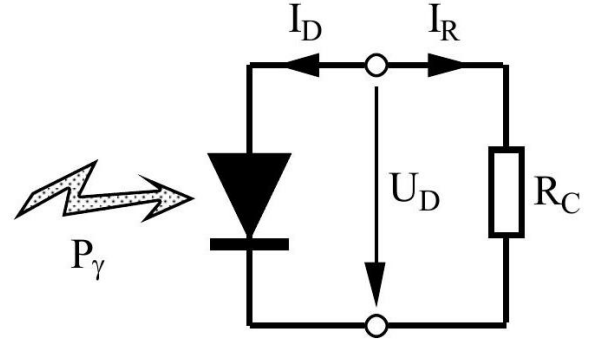


FIGURE 3 – Schéma d'une diode.

À température et éclairage constants, le rendement d'une cellule solaire dépend de la charge dans le circuit électrique. En circuit ouvert ( $R_C = \infty, I_R = 0, U_D = U_{D\max}$ ) ou en court-circuit ( $R_C = 0, I_R = I_{R\max} = I_\gamma U_D = 0$ ), aucune énergie n'est transmise à l'extérieur. Entre ces deux extrêmes, il existe une valeur optimale  $R_{opt}$  de la résistance de charge  $R_C$  pour laquelle la puissance  $P = U_D I_R$  fournie par la cellule solaire à la résistance de charge est maximale, et vaut  $P_{\max}$  (voir Figure 4).

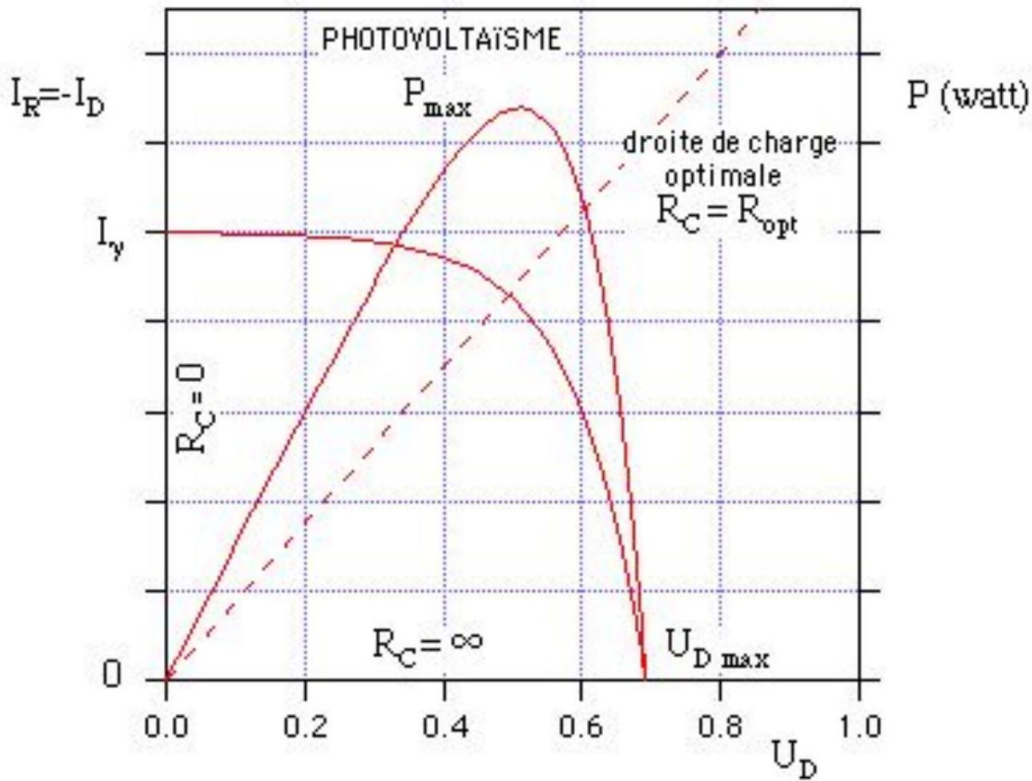


FIGURE 4 – Courbe de puissance d'une photodiode.

Le rendement énergétique de la cellule solaire est défini par  $\eta = P/P_\gamma$ , où  $P_\gamma$  est la puissance lumineuse incidente sur la surface de la cellule. Pour la valeur optimale  $R_{opt}$  de la résistance de charge  $R_C$ , le rendement de la cellule solaire est maximum, et vaut  $\eta_{\max} = P_{\max}/P_\gamma$ . La valeur  $R_{opt}$  n'est pas une constante caractéristique pour une cellule donnée, mais dépend du spectre du rayonnement incident et de la température de la jonction. En fait, le rendement diminue lorsque

la température augmente, ce qui conduit parfois à construire des capteurs hybrides résultant de la combinaison d'un capteur thermique et d'une cellule solaire, qui permettent de produire simultanément de l'eau chaude et d'augmenter le rendement photovoltaïque en refroidissant la cellule.

La puissance fournie par la cellule solaire ( $P = U_D I_R$ ) et son rendement ( $\eta = P/P_\gamma$ ) dépendent du matériau utilisé et de la technologie de fabrication (silicium amorphe, silicium polycristallin, silicium monocristallin), de la géométrie de la jonction (épaisseur des couches, multicouches, etc.) et des paramètres extérieurs (température, spectre et puissance du rayonnement incident, circuit électrique extérieur connecté à la cellule, etc.).

## 2 But de l'expérience

Le but de cette manipulation est de se familiariser avec les propriétés fondamentales de différentes cellules photovoltaïques en silicium, de comparer les rendements de différentes technologies de fabrication (cellules amorphes, monocristallines ou polycristallines) et d'étudier le comportement de ces cellules en fonction de différents paramètres extérieurs (spectre du rayonnement lumineux incident, intensité lumineuse incidente, température, angle d'incidence du rayonnement, etc.).

Le montage de base comporte les éléments suivants :

- un banc optique
- une source de rayonnement ultraviolet+visible+infrarouge  
Puisque la source naturelle d'éclairage, le soleil, n'est pas toujours disponible, on la remplace, pour les expériences, par une lampe dont le spectre est proche du spectre solaire. Le spectre d'une lampe à incandescence ne convient pas, par contre le spectre de la lampe à vapeur de Hg aux halogénures métalliques avec des additifs d'iodure de dysprosium (OSRAM HQI, HQL) est assez proche du spectre solaire.
- trois cellules solaires de technologies différentes (Si amorphe, Si monocristallin et Si polycristallin)
- deux multimètres pour les mesures de  $U_D$ ,  $I_R$  et  $P$
- un thermocouple pour la mesure de la température de la jonction
- un capteur de puissance lumineuse incidente permettant de déduire  $P_\gamma$
- une décade de résistance, permettant de réaliser différentes valeurs de résistance de charge  $R_C$
- un jeu de filtres photographiques permettant de modifier le spectre du rayonnement lumineux incident (caractéristiques des filtres données en annexe)

### 3 Travaux suggérés

Réaliser le montage représenté à la Figure 5. Une image du montage est disponible en Figure 6.

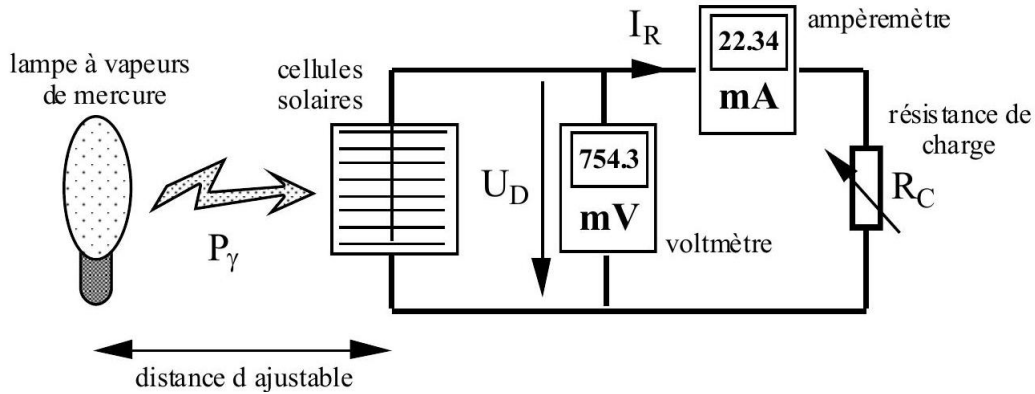


FIGURE 5 – Schéma expérimental

1. Pour plusieurs valeurs différentes de la distance  $d$ , mesurer la puissance lumineuse incidente  $P_\gamma$ . Réaliser un graphique de  $P_\gamma (1/d^2)$  et expliquer l'origine de cette relation.
2. Sous deux conditions d'éclairement différentes (deux distances  $d$  différentes entre la source lumineuse et les cellules photovoltaïques), tracer les courbes caractéristiques  $I_R (U_D)$  des cellules photovoltaïques des trois technologies en modifiant la résistance de charge  $R_C$ .
3. Tracer les courbes de puissance  $P (U_D)$  de ces trois types de cellule pour les deux conditions d'éclairement différentes choisies sous le point 2. En déduire  $P_{\max}$  et, à l'aide du capteur d'intensité lumineuse, le rendement maximum  $\eta_{\max}$  sous les deux conditions d'éclairement différentes. Comparer les rendements des différentes technologies.
4. Pour plusieurs valeurs différentes de la distance  $d$  entre la source lumineuse et les cellules photovoltaïques, mesurer le courant de court-circuit  $I_R = I_{R\max} = I_\gamma (R_C = 0, U_D = 0)$  des trois types de cellules solaires. En déduire et discuter les graphiques  $I_\gamma (P_\gamma)$ , à l'aide de mesures faites dans les mêmes conditions avec le capteur d'intensité lumineuse. Mesurer la grandeur caractéristique moyenne  $i = I_\gamma / P_\gamma (\text{mA/W})$  de chacune des cellules solaires.
5. En conservant une distance  $d$  fixe entre la source lumineuse et les cellules photovoltaïques, mesurer le courant de court-circuit  $I_R = I_{R\max} = I_\gamma (R_C = 0, U_D = 0)$  des trois types de cellules solaires pour différentes compositions spectrales de la lumière incidente, en se servant des filtres photographiques à disposition. En déduire, par des mesures faites à l'aide du capteur d'intensité lumineuse à travers ces mêmes filtres photographiques, la grandeur caractéristique  $i = I_\gamma / P_\gamma (\text{mA/W})$  pour différentes compositions spectrales de la lumière incidente. Discuter la sensibilité spectrale des différentes cellules solaires.
6. Un rendement de 10% est garanti par le fabricant pour la cellule silicium monocristalline, sous éclairage de  $1000 \text{ W/m}^2$ . Comparer ce rendement avec celui mesuré sur cette cellule et discuter la raison d'éventuels écarts entre données du fabricant et mesures au laboratoire.

### Autres suggestions :

7. Déterminer la variation de  $I_\gamma$  en fonction de l'angle d'incidence du rayonnement.
8. Déterminer la variation de  $I_\gamma$  en fonction de la distance source-cellule.
9. Déterminer la variation de  $I_\gamma$  en fonction de la température de la jonction.

## 4 Annexe

### Caractéristiques des filtres photographiques à disposition :

numéro du filtre	couleur du filtre	longueurs d'onde dans la bande passante	transmissivité dans la bande passante
2B	jaune clair	$\lambda > 400 \text{ nm}$	90%
8	jaune	$\lambda > 500 \text{ nm}$	90%
16	jaune-orange	$\lambda > 550 \text{ nm}$	90%
25	rouge	$\lambda > 600 \text{ nm}$	90%
87C	infrarouge	$\lambda > 850 \text{ nm}$	90%
47	bleu	$500 \text{ nm} > \lambda > 400 \text{ nm}$ et $\lambda > 700 \text{ nm}$	50% 90%
58	vert	$600 \text{ nm} > \lambda > 500 \text{ nm}$ et $\lambda > 700 \text{ nm}$	50% 90%

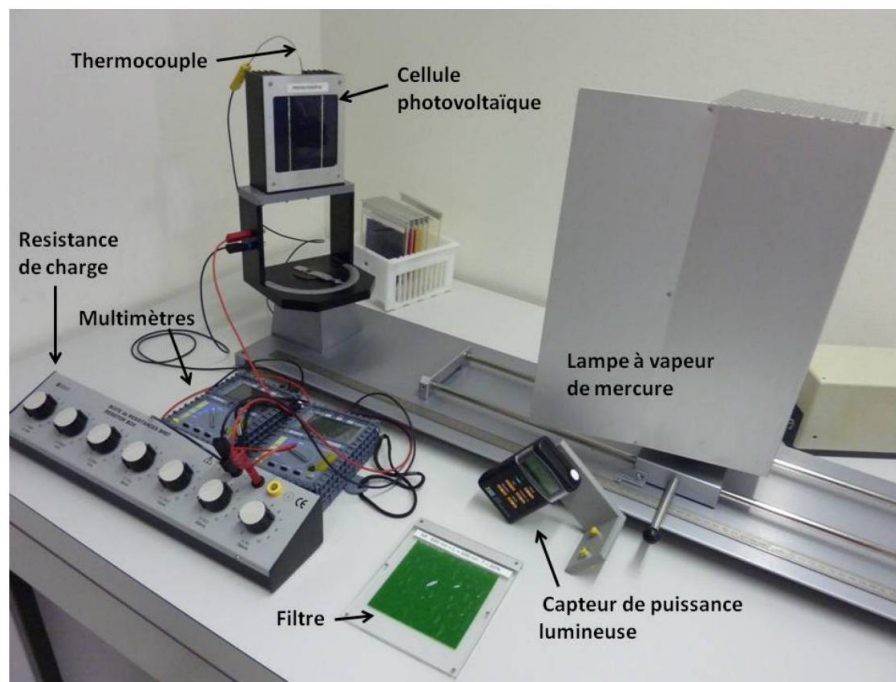


FIGURE 6 – Image du montage.