

# Caractérisation d'une cellule photovoltaïque et comparaisons de son rendement

Oda BO, Melissa BEHLOULI, Diego ORMAECHEA, Victor PERRIN-TURENNE, and Matthieu ROUX  
(Dated: 9 mai 2018)

## I. INTRODUCTION

### A. Le projet

#### 1. Contexte environnemental propice à l'étude de solutions durables permettant la production d'énergie en général

Se défaire des énergies fossiles reste le grand enjeu du XXIème siècle. En effet, ces dernières sont toujours plus sollicitées alors que les quantités exploitables diminuent avec le temps. Il existe plusieurs sources d'énergies durables, inépuisables et disponibles partout dans le monde. Notamment celle issue du Soleil, qui permet la production d'électricité. En effet, en seulement une heure, le soleil produit assez d'énergie pour couvrir le besoin énergétique annuel des hommes[8]. Généralement, nous avons recours à l'utilisation de panneaux solaires composés de cellules photovoltaïques pour opérer cette transformation.

#### 2. But du projet : Caractériser une cellule industrielle mystère et effectuer une comparaison avec deux autres cellules que nous avons fabriquées

Au cours de ce projet, nous avons étudié le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque industrielle, "mystère". Nous avons cherché à identifier les principales caractéristiques de cette cellule. Nous avons également construit 2 cellules solaires plus simples, une cellule en cuivre et une cellule à colorant, dite Grätzel. Notre étude concerne également la comparaison du rendement de ces 2 cellules par rapport à notre cellule industrielle. L'article résume de manière concise : les expériences, observations et conclusions qui nous ont permis de mener à bien notre projet.

### B. Contexte

#### 1. Effet photoélectrique

L'explication de l'effet photoélectrique[1] a été introduite par Albert Einstein en 1905. Cette explication lui valut le prix Nobel de physique en 1921. Les photons de la source lumineuse possèdent une énergie caractéristique déterminée par la fréquence de la lumière. Lorsqu'un électron du matériau absorbe un photon et que l'énergie de celui-ci est suffisante, l'électron est éjecté (voir FIG.1.). On parle d'énergie seuil ou de seuil de fréquence. Après d'absorption du photon par l'atome, le photoélectron émis a une énergie  $E_c$ :

$$E_c = E_b - E_p$$

où  $E_b$  l'énergie de liaison et  $E_p$  l'énergie du photon absorbé

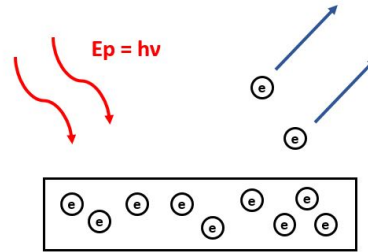


FIG. 1. Schéma de l'effet photoélectrique

#### 2. Effet photovoltaïque

Nous mettons en évidence un des effets photoélectriques : l'effet photovoltaïque. Il est le produit du choc des photons de la lumière sur un matériau semi-conducteur qui transmet leur énergie aux électrons qui génèrent une tension électrique. La cellule photovoltaïque est un composant électronique, qui la plupart du temps est composée de semi-conducteur. En effet les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ce qui génère des paires électrons-trous et in fine un courant électrique. Il y a excitation d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction (voir FIG.2.).

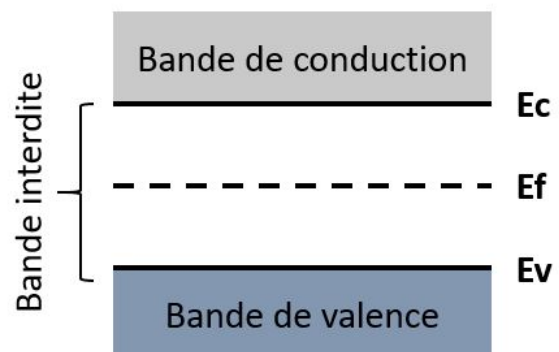


FIG. 2. Illustration des bandes de Valence et de Conduction dans un semi-conducteur

## II. LA CELLULE MYSTÈRE

### A. Présentation

#### 1. Cellule à silicium et jonction PN[2]

##### Dopage du silicium

**Dopé n** - Si l'on introduit dans le réseau de silicium des atomes pentavalents tels que le phosphore ou l'arsenic, quatre électrons sont utilisés pour les liaisons avec les Si voisins, le cinquième est très peu lié et a une très grande probabilité d'être excité vers la bande de conduction.

**Dopé p** - Si l'on introduit des atomes trivalents (bore), il manque maintenant un électron pour former les quatre liaisons autour de l'impureté. Un électron sera excité depuis la bande de valence pour combler cette lacune et il reste un trou dans la bande de valence.

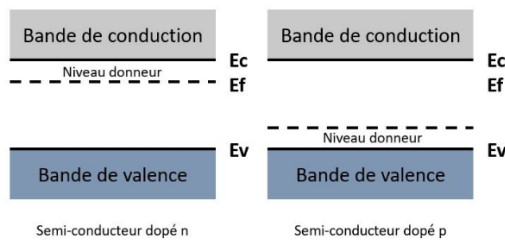


FIG. 3. Schémas de l'effet des dopages n et p sur les bandes d'énergies du silicium

Si un semi-conducteur est éclairé avec des photons d'énergie supérieure à la largeur de la bande interdite, ces photons sont absorbés et il en résulte l'excitation d'un certain nombre d'électrons de la bande de valence vers la bande de conduction BC. Il reste des trous p dans la bande de valence. Mais rien ne permet de séparer les paires électron-trou ainsi formées. Il faut donc trouver un moyen de séparer les charges initialement formées. Ceci est réalisé dans un dispositif appelé jonction PN.

##### La jonction PN

Une jonction PN représente la mise en contact d'une surface de cristal de semi-conducteur dopé p avec une surface de cristal de semi-conducteur dopé (voir FIG.4. sans quantification du dopage).

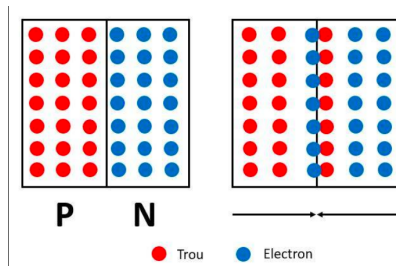


FIG. 4. Schéma théorique de la jonction PN

À la jonction, les porteurs de charges, c'est-à-dire les électrons et les trous, se neutralisent. On parle de diffusion des porteurs de charges. À l'équilibre, il existe donc une zone sans charge mobile, appelée zone de déplétion (voir FIG.4. après mise en contact); une différence de potentiel entre la zone n et la zone p, appelée **potentiel de jonction** apparaît également à l'équilibre.

#### 2. Caractéristiques attendues pour une cellule à jonction PN[3]

Une cellule photovoltaïque possédant une jonction PN est équivalente à une diode qui est une composante électronique qui laisse passer un courant (avec une chute de tension) dans un sens, et qui ne le laisse pas passer dans l'autre sens. Le schéma électrique d'une cellule photovoltaïque est le suivant:

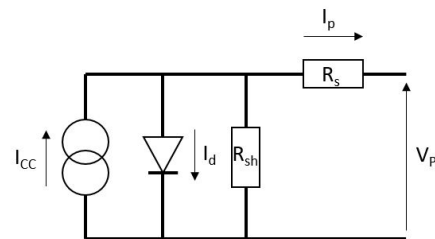


FIG. 5. Schéma représentant une cellule photovoltaïque

##### Description du circuit FIG.5.

Le circuit est composé d'un générateur de courant  $I_{CC}$  en parallèle avec une diode, traversé par le courant  $I_D$ . En parallèle avec la diode, il y a une résistance  $R_{sh}$  (shunt resistance) qui correspond aux pertes à travers la jonction. En sortie du circuit on trouve l'énergie électrique avec une tension  $V_P$  et un courant  $I_P$ . Les cellules photovoltaïques sont caractérisées par leur courbe courant ( $I_P$ ) - tension ( $V_P$ ), équivalente à celle d'une diode. Voici une caractéristique j-V standard d'une jonction PN simple à base de silicium (FIG.6.).

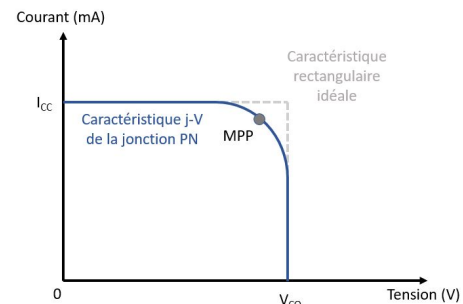


FIG. 6. Caractéristique J-V

Convention pour les cellules photovoltaïque : le courant est inversé par rapport à celui d'une diode normale pour éviter d'avoir un signe négatif. La caractéristique j-V est défini par les grandeurs physiques suivantes :

- VCO : la tension à vide, la tension générée par la cellule non raccordée, éclairée
- ICC : le courant court-circuit, le courant généré par la cellule raccordée à elle-même
- MPP : le point de puissance maximal : le point où la tension et le courant sont optimaux

On remarque que la puissance varie entre 0 W pour le point ICC, P<sub>MAX</sub> pour le point MPP et 0 W pour le point VCO.

## B. Manipulations

### 1. Méthode générateur

Cette méthode consiste à appliquer une tension des deux côtés de la cellule photovoltaïque à l'aide d'un générateur de tension. En mesurant le courant correspondant à l'aide d'un ampèremètre, nous pouvons tracer la caractéristique j-V.

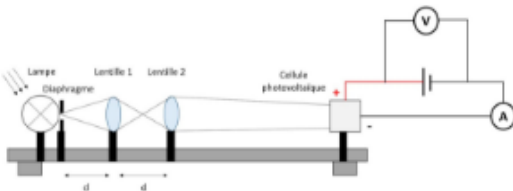


FIG. 7. Montage de la méthode générateur

### 2. Méthode résistance variable[4]

Avec cette méthode il faut remplacer le générateur par une ou plusieurs résistances variables. La résistance crée une différence de potentiel aux bornes de la cellule photovoltaïque. Comme dans la première méthode, nous mesurons le courant à l'aide d'un ampèremètre.

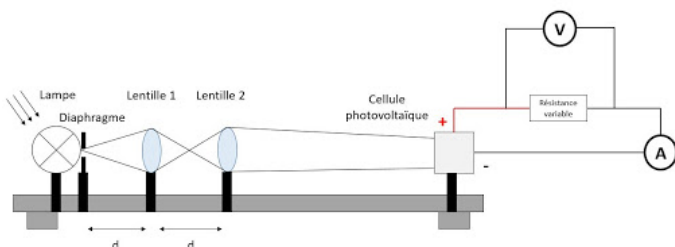


FIG. 8. Montage de la méthode résistance variable

## 3. Incertitudes et reproductibilité

La reproductibilité des mesures repose sur la précision du montage et de la précision fournie par l'instrument de mesure pour la tension, l'éclairement, l'intensité du courant et la surface de la cellule photovoltaïque. Pour la méthode générateur, l'incertitude sur la tension délivrée par le générateur est également à prendre en compte.

- Incertitude sur la tension :  $\delta V=0,1$  V pour la méthode générateur (précision du générateur de tension et  $\delta V=0,01$  V pour la méthode résistance variable (précision du voltmètre).

**Le reste des des incertitudes est commune aux deux méthodes.**

- Incertitude sur l'éclairement :  $\delta E = 50$  lux / Variation observée au luxmètre pour un illuminant fixe pendant 1 minute.
- Incertitude sur la surface :  $\delta S=0,002$  m<sup>2</sup> / Incertitude sur la mesure.
- Incertitude sur l'intensité du courant :  $\delta I=0,001$  mA / La valeur affichée par l'ampèremètre est variable. Face à ces variations, nous avons établi un protocole pour estimer l'incertitude sur l'intensité du courant délivrée par la cellule. On réalise pour chacune des deux méthodes, une prise de mesure Intensité-Tension j-U pour un illuminant identique à 5000 lux (voir FIG.9.). On étudie les écarts entre les deux intensités mesurées pour une même valeur de tension U (voir FIG.10.). On conclut que l'incertitude sur l'intensité délivrée par la cellule est de 0,2 mA.

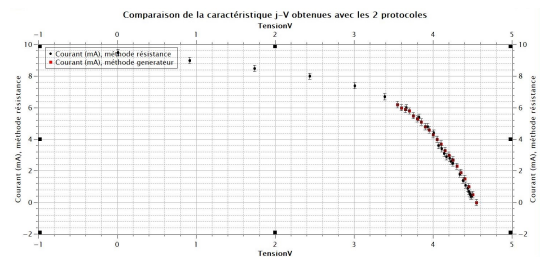


FIG. 9. Graphiques de l'intensité du courant mesurée en fonction de la tension pour chaque protocole

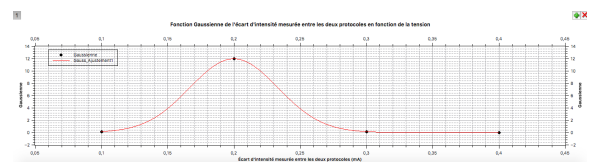


FIG. 10. Distribution gaussienne des écarts d'intensité mesurés entre les deux protocoles

## C. Exploitations

### 1. Caractéristiques de notre cellule[5]

Voici la courbe courant-tension obtenue avec un éclairage de 5000 lux (FIG.11.). Le point MPP correspond au point de puissance ( $P=UI$ ) maximale.

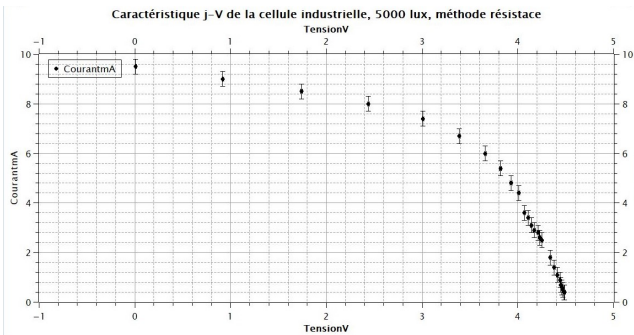


FIG. 11. Courbe J-V à 5000 lux

- $V_{co} = 4.5$  V
- $I_{cc} = 9.5$  mA
- $V_{mpp} = 3.39$  V
- $I_{mpp} = 6.7$  mA
- $P_{max} = 22.713$  W

Voici la courbe courant-tension obtenue avec un éclairage du soleil à 67 000 lux (FIG.12.) :

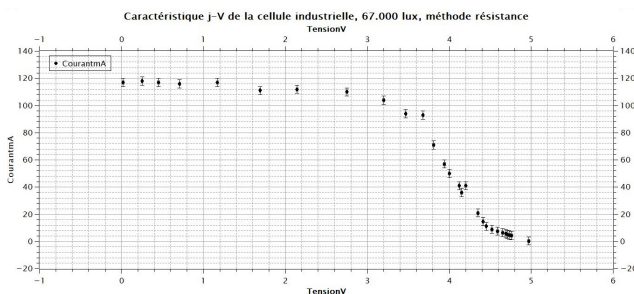


FIG. 12. Courbe J-V à 67 000 lux

- $V_{co} = 5$  V
- $I_{cc} = 117$  mA
- $V_{co} = 3.2$  V
- $V_{co} = 104$  mA
- $V_{co} = 332.8$  W

On voit que la tension à vide est un peu plus élevée quand la cellule est éclairée par le 67000 lux, et également que le courant court-circuit est beaucoup plus élevé quand on l'éclaire avec plus de lux. On remarque aussi que le point de puissance maximale MPP se trouve environ à la même abscisse  $V(MPP)$  dans les deux cas, mais que le courant délivré à ce point et, in fine, la puissance produite est beaucoup plus élevée quand la cellule est éclairée par le soleil. Les valeurs caractéristiques obtenues grâce à ces courbes sont également utiles pour calculer le facteur de forme de la cellule.

### Calcul du facteur de forme

Les cellules photovoltaïques sont caractérisés par leur facteur de forme, qui donne la qualité de la cellule. Le facteur de forme est donné par la formule suivante:

$$FF = \frac{V_{mpp} * I_{mpp}}{V_{co} * I_{cc}}$$

Les facteurs de forme typiques varient entre 50% et 82% et les cellules silicium cristallin donnent les meilleurs facteurs de formes. Nous trouvons les facteurs de forme suivants pour notre cellule industrielle:

$$FF_{5000lux} = 53\% \pm 1.9\%$$

$$FF_{67000lux} = 57\% \pm 0.26\%$$

### Incertitude sur le facteur de qualité

$$\Delta FF = \sqrt{\left(\frac{\partial FF}{\partial V_{MPP}} \Delta V_{MPP}\right)^2 + \left(\frac{\partial FF}{\partial I_{MPP}} \Delta I_{MPP}\right)^2 + \left(\frac{\partial FF}{\partial V_{CO}} \Delta V_{CO}\right)^2 + \left(\frac{\partial FF}{\partial I_{CC}} \Delta I_{CC}\right)^2}$$

$$\Delta FF = \sqrt{\left(\frac{I_{MPP}}{V_{CO} * I_{CC}} \Delta V\right)^2 + \left(\frac{V_{MPP}}{V_{CO} * I_{CC}} \Delta I\right)^2 + \left(\frac{-V_{MPP} * I_{MPP}}{V_{CO}^2 * I_{CC}} \Delta U\right)^2 + \left(\frac{-V_{MPP} * I_{MPP}}{V_{CO} * I_{CC}^2} \Delta I\right)^2}$$

FIG. 13. Incertitude sur le facteur de qualité

Le facteur de forme de notre cellule se trouve dans la tranche basse de l'encadrement typique des cellules, ce qui signifie que sa qualité est assez faible. Le facteur de forme est directement relié aux pertes de la diode et à les valeurs des résistance  $R_{sh}$  et  $R_s$  dans le schéma électrique de la partie 2.1.3. Pour augmenter l'efficacité et la puissance maximale de la cellule photovoltaïque, il faut augmenter les valeurs de ces résistances. Ainsi, le facteur de forme augmentera également.

### Calcul du rendement[6]

$$\eta = \frac{P_{recue}}{P_{envoyee}} = \frac{U * I * K}{E * S}$$

$U$  = Tension (en Volt)  
 $I$  = Courant (en Ampère)  
 $K$  = Efficacité lumineuse de la source (en Lumen/watt)  
 $E$  = Eclairage (en lux)  
 $S$  = Surface du panneau (en  $m^2$ )

L'efficacité lumineuse K dépend de la source lumineuse utilisé. D'après la littérature, la valeur de K pour le soleil est de 115 lm/W.

La seule information que nous avons à propos de la lampe utilisée pour les mesures à 5000 lux et que c'est une lampe halogène de xW. Nous pouvons donc au mieux faire un encadrement de la valeur du K pour la lampe, qui devrait se trouver 15 et 20.

Rendement pour la mesure avec le soleil(67 000 lux) :

$$\eta_{ind,67000lux,K=15} = 1,44\% \pm 0,33\%$$

Rendement pour la mesure avec le soleil(50 000 lux) :

$$\eta_{ind,50000lux,K=15} = 1,34\% \pm 0,31\%$$

$$\eta_{ind,50000lux,K=20} = 1,79\% \pm 0,51\%$$

Nous remarquons que le rendement de la cellule industrielle que nous avons récupéré est très faible par rapport aux ordres de grandeurs des différentes cellules photovoltaïques. En effet, les cellules au silicium monocristallin et polycristallin ont des rendements de 16% à 24% et de 14% à 18%. La cellule à notre disposition se rapproche plus des cellules en silicium amorphe. Celles-ci ont un rendement en plein soleil de 5% à 7%, qui diminue avec le temps d'exposition à la lumière naturelle. Cela semble cohérent avec nos faibles valeurs. Voici le calcul des incertitudes sur le rendement :

$$\Delta\eta = \sqrt{\left(\frac{\delta\eta}{\delta U} \Delta U\right)^2 + \left(\frac{\delta\eta}{\delta I} \Delta I\right)^2 + \left(\frac{\delta\eta}{\delta E} \Delta E\right)^2 + \left(\frac{\delta\eta}{\delta S} \Delta S\right)^2}$$

$$\Delta\eta = \sqrt{\left(\frac{IK}{ES} \Delta U\right)^2 + \left(\frac{UK}{ES} \Delta I\right)^2 + \left(\frac{UIK}{E^2S} \Delta E\right)^2 + \left(\frac{-UIK}{E^2S} \Delta S\right)^2}$$

On obtient

$$\Delta U = 0.01 \text{ V}$$

$$\Delta I = 0.0002 \text{ A}$$

$$\Delta E = 50 \text{ lux}$$

$$\Delta S = 0.002 \text{ m}^2$$

On utilise le même calcul d'incertitudes pour toutes les cellules. La faible valeur de notre rendement est cohérente avec notre facteur de forme. En effet le facteur de forme est directement proportionnel au rendement de la cellule.

### III. COMPARAISON

#### A. La cellule de cuivre

##### 1. Principe et fonctionnement du montage

La cellule solaire en cuivre est composée de deux plaques de cuivre, l'une oxydée et l'autre non. Les deux plaques sont disposés face à face dans une cuve remplie d'eau chaude et salée. Pour générer un courant il faut éclairer la plaque oxydée en cachant au mieux la plaque non oxydée. Les photons arrivent sur la plaque oxydée et y arrache des électrons qui vont être ramenés par l'intermédiaire de l'eau salée jusqu'à la plaque

non oxydée. C'est le même fonctionnement qu'une batterie, mais qui marche avec l'énergie du soleil.

##### 2. Calcul du rendement

Rendement pour la mesure avec le soleil (67 000 lux) :

$$\eta_{cu,67000lux,K=115} = 0,0002\% \pm 0,00015\%$$

Rendements pour la mesure avec la lampe (5000 lux) pour K=15 et K=25:

$$\eta_{cu,5000lux,K=15} = 0,0002\% \pm 0,00019\%$$

$$\eta_{cu,5000lux,K=25} = 0,0004\% \pm 0,00033\%$$

##### 3. Comparaison avec la cellule industrielle

Le rendement de la cellule en cuivre est très faible. Plus précisément, la cellule génère 10W pour une surface de 0.008  $m^2$ , ce qui correspond à 1,265mW/ $m^2$ . Pour allumer une ampoule classique de 100W, il faudra donc 79 051  $m^2$  de cuivre ! Pour comparer, sous le soleil également, la cellule industrielle génère 80 mW pour une surface de 0.009  $m^2$ . Ceci correspond à 8.9 W/ $m^2$ . Pour allumer une ampoule de 100 W, il faudra donc 11,25  $m^2$  de panneau. Pour délivrer une puissance égale, la surface de la cellule à cuivre doit être supérieure à celle de la cellule industrielle d'un facteur 7111. Le cuivre n'est donc dans aucun cas un bon alternatif aux cellules fabriquées avec des semi-conducteurs.

## B. La cellule à colorants

##### 1. Principe de fonctionnement et dispositif du montage[4]

Les cellules à colorants sont des systèmes photoélectrochimiques qui imitent le processus de photosynthèse végétale. La cellule se compose de 2 électrodes transparentes, ici il s'agit de 2 lames de verre conducteur. On dépose sur une électrode, un semi-conducteur mésoporeux : le dioxyde de titane (TiO<sub>2</sub>). Puis une monocouche de colorant naturel, l'anthocyanine présent dans le jus de framboises. La seconde électrode est en contact avec le couple redox Iodure/Triiodure (I<sub>3</sub>/I) qui permet l'échange d'électrons entre les 2 électrodes et qui ainsi complète le circuit électrique. La cellule à colorant fonctionne selon un cycle régénératif, découpé en plusieurs étapes :

1) Un photon incident vient exciter le colorant (présent dans la cellule) qui joue le rôle de sensibilisateur. Le colorant entre donc dans un état excité et expulse un électron.

2) L'électron expulsé est amené par l'intermédiaire du dioxyde de titane vers l'anode. Puis, par l'intermédiaire d'un canal à électrons vers la cathode. Ce canal de passage s'établit à travers la mise en contact des 2 électrodes.

- 3) Au niveau de la cathode, l'électron rentre en contact avec l'oxydant  $I_3^-$  de l'électrolyte. Par le processus d'oxydoréduction, le réducteur  $I^-$  est formé.
- 4) Le réducteur  $I^-$  fournit ensuite l'électron manquant au colorant appauvri en électrons.

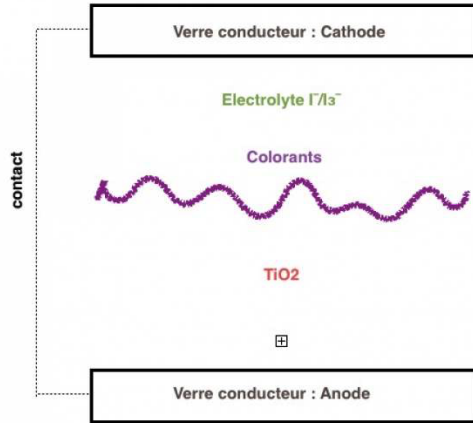


FIG. 14. Schéma de la cellule à colorant

## 2. Calcul du rendement

Nous avons éclairé la cellule à colorant, à l'aide d'une lampe halogène à 300 lux. Ainsi, nous avons pu calculer le rendement de la cellule pour différentes efficacités lumineuses  $K$ . On obtient un rendement variant entre 0,06% et 0,11%.

$$\eta_{col,300lux,K=15} = 0,063\% \pm 0,34\%$$

$$\eta_{col,300lux,K=25} = 0,1125\% \pm 0,57\%$$

On remarque que l'incertitude sur le rendement est assez élevé. Ceci est due à la surface assez faible (environ  $4 \text{ cm}^2$ ) de la cellule qui entre en jeu dans le calcul de l'incertitude.

## 3. Comparaison avec la cellule industrielle

On remarque que le rendement de notre cellule à colorant est minime par rapport au rendement théorique présenté par Greg Smestad dans son article[4]. En effet, le rendement théorique d'une cellule à colorant de  $4 \text{ cm}^2$  est compris entre 0.5% et 1%. On explique cette différence par un fonctionnement limité de la cellule qui est du à une fabrication imparfaite.

De plus, cette cellule présente une puissance maximale à 5.4 W pour une surface de  $4 \text{ cm}^2$ . Ainsi pour allumer une ampoule de 100 W, il faudrait utiliser  $7407.4 \text{ m}^2$  de cellules à colorant. Soit une surface 10 fois inférieure à celle dont on a besoin avec le dispositif en cuivre.

Mais la cellule à colorant, reste peu efficace par rapport à une cellule industrielle. En effet, pour délivrer une puissance égale, la surface d'une cellule à colorant doit être supérieure à celle de la cellule industrielle d'un facteur 658.

## IV. CONCLUSION[7]

Pour conclure cet article, nous avons pu déterminer les principales caractéristiques de notre cellule mystère. À partir de celles-ci, nous émettons l'hypothèse que cette cellule industrielle est une cellule en silicium amorphe. Par rapport à la cellule de cuivre et celle à colorant, la cellule mystère présente un rendement supérieur. La cellule industrielle est donc la meilleure option par rapport aux autres. Cependant, en termes de rendement, elle reste peu efficace par rapport à des cellules industrielles de types silicium polycristallin ou monocristallin.

Aujourd'hui, de nombreuses recherches sont faites pour améliorer la performance de telles cellules. Cela peut s'opérer par l'addition de fonctionnalités aux cellules. Actuellement des équipes de recherche chinoises mettent au point les cellules solaires de demain, capables d'utiliser l'énergie solaire et l'énergie mécanique issue des gouttes pluie qui s'abattent sur elles.

[1] Edmond Becquerel, *La lumière, ses causes et ses effets*, 1868

[2] *OpenClassrooms-semiconducteurs*, [https://openclassrooms.com/courses/1-electronique-de-zero/introduction-aux-semi-conducteurs], consulté le 22/4/2018

[3] *Open Classrooms-la diode*, [https://openclassrooms.com/courses/1-electronique-de-zero/la-diode-1], consulté le 22/4/2018

[4] Smestad Greg, *Demonstrating Electron transfer and Nanotechnology*, Journal of chemical education, 1998

[5] Domain François et Boileau Hervé, *Caractéristiques électriques des cellules et des panneaux photovoltaïques*,

[http://www.labri.fr/perso/billaud/Helios2/resources/fr07/Chap\7\FR.pdf], téléchargé le 2/5/2018

[6] *Rendement du panneau solaire*, [https://www.pedagogie.ac-aix-marseille.fr/upload/docs/application/pdf/2012-10/activite\_doc.\_rendement\_du\_panneau\_solaire\_photovoltaique.pdf], téléchargé le 15/3/2018

[7] *Photovoltaïque.info*, [http://www.photovoltaique.info/Les-technologies-de-cellules.html], consulté le 7/5/2018

[8] *Réalisation et caractérisation des cellules photovoltaïques organiques*, [https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01443621/document], consulté le 7/5/2018