

# Graphène et énergie solaire pour toutes les populations

## Graphene and Solar Power for the Masses

**Développer le graphène pour sa flexibilité et sa facilité de fabrication, pour des applications photovoltaïques abordables. [Dr Mae Wan Ho](#)**

**Rapport de l'ISIS en date du 24/07/2013**

Une [version entièrement illustrée et référencée](#) de cet article intitulé **Graphene and Solar Power for the Masses** est disponible et accessible par les membres de l'ISIS sur le site [http://www.i-sis.org.uk/Graphene\\_and\\_Solar\\_Power\\_for\\_the\\_Masses.php](http://www.i-sis.org.uk/Graphene_and_Solar_Power_for_the_Masses.php) ; elle est par ailleurs disponible en téléchargement [ici](#)

**S'il vous plaît diffusez largement et rediffusez, mais veuillez donner l'URL de l'original et conserver tous les liens vers des articles sur notre site ISIS. Si vous trouvez ce rapport utile, s'il vous plaît, soutenez ISIS en vous abonnant à notre magazine [Science in Society](#), et encouragez vos amis à le faire. Ou jeter un oeil à notre librairie [ISIS bookstore](#) pour d'autres publications**

### **Le graphène pourrait générer 10 paires de porteurs de charge pour chaque photon absorbé**

Un processus clé dans l'obtention de l'électricité à partir de la lumière est la création des [porteurs de charge](#) de [paires électron-trou](#) excités par l'absorption de la lumière.

L'efficacité du processus dépend essentiellement de ce qui se passe pour les porteurs de charge excités : l'efficacité peut être grandement améliorée si, au lieu de perdre de l'énergie sous forme de chaleur (ou [phonons](#)), les porteurs de charge excités utilisent leur excès d'énergie pour produire des paires d'électron-trou, à travers une [interaction transporteur-transporteur](#) ou un [processus de diffusion](#).

Une équipe internationale de chercheurs dirigée par Jan Tielrooij et Frank Koppens à l'Institut de *Ciències Fotoniques*, (Sciences photoniques) à Barcelone, en Espagne, a effectué des mesures montrant que la diffusion transporteur-transporteur prédomine dans le [graphène](#) qui est exposé à la lumière sur une large plage de longueurs d'ondes, ce qui entraîne la production d'électrons secondaires «chauds» de la bande de conduction qui peuvent conduire des courants électriques : cela améliore grandement l'efficacité de la [conversion des photons en électricité](#) [1].

Les propriétés uniques du graphène, qui en font un convertisseur efficace de [photons](#) en électricité, sont sa [bande interdite de largeur nulle](#), son [spectre d'absorption](#) de la lumière plate et ses [interactions fortes](#) électron-électron (voir [2] [Why Graphene is Amazing](#), *SiS* 59) \*.

\* Version en français "Pourquoi le graphène est-il si étonnant ?" par le Dr Mae-Wan Ho. Traduction et compléments de Jacques Hallard ; accessible sur le site : <http://isias.transition89.lautre.net/spip.php?article329>

Des travaux théoriques ont déjà suggéré que le graphène peut créer plusieurs paires électron-trou à partir d'un seul photon absorbé lors de la relaxation de la paire électron-trou primaire et excitée par la lumière. Au lieu de perdre l'énergie d'excitation en excès sous forme de chaleur ou de [phonons](#), le graphène transfère l'énergie à d'autres électrons pour créer des porteurs de charge chauds. Mais on ne connaît pas exactement dans la pratique l'efficacité du processus.

L'équipe de chercheurs a utilisé une impulsion lumineuse ultra-rapide dans la gamme optique pour «pomper» (exciter) le système graphène, puis ils ont fait usage d'une sonde dans la région ou bande de fréquence [TeraHertz](#) ( $10^{12}$  Hz) (bien au-dessus du [spectre visible](#)) pour suivre la dynamique de l'excitation de la paire d'électron-trou par des changements dans l'émission de la sonde après différents temps de retard [1].

L'échantillon de graphène intrinsèquement dopé est composé d'une monocouche développée par dépôt chimique en [phase vapeur](#) et transféré sur un substrat de quartz (voir [3] [Graphene from Greenhouse Gases to Save the Climate](#), *SiS* 59) \*.

\* La version en français s'intitule « **Le graphène obtenu à partir de gaz à effet de serre pour sauver le climat** ».

A partir d'autres mesures, l'[énergie de Fermi](#) (énergie des électrons moins étroitement retenus) a été déterminée à 0,17 eV, ce qui correspond à une concentration en porteurs intrinsèques de  $2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ .

L'impulsion lumineuse ultra-rapide a été appliquée à différentes longueurs d'onde pour 'pomper' (exciter) l'échantillon. Et la réponse de la sonde, après différents temps de retard, a été enregistrée. La transmission de la sonde augmente dans un premier temps pour atteindre, d'une façon approximativement linéaire, un pic avec un temps de retard d'environ 200 fs ([femto seconde](#) =  $10^{-15}$  seconde), puis elle décroît sur une échelle de temps plus longue, de l'ordre d'environ 1.400 fs. Ceci est expliqué comme suit.

Au cours de la montée initiale, la diffusion transporteur-transporteur entre les porteurs photo-excités et les autres transporteurs dans le niveau de Fermi, favorise les transporteurs dans l'énergie de Fermi, amène ces porteurs d'un niveau inférieur à un niveau supérieur à l'énergie de Fermi, provoquant la création de porteurs chauds jusqu'au pic d'environ 200 fs, lorsque les porteurs photo-excités se sont détendus, et qu'une distribution de transporteur chaud est établie. La détente ou relaxation ultérieure des porteurs chauds se produit sur une échelle de temps beaucoup plus longue.

Les chercheurs ont constaté que la densité de porteurs excités augmente linéairement avec la densité des photons absorbés, ainsi qu'avec l'énergie du photon (lorsque la densité de photons absorbés est maintenue constante), sur une plage qui s'étend sur près d'un ordre de grandeur dans la longueur d'onde des photons, à partir de l'infrarouge (1,6 eV) vers l'ultraviolet (4,65 eV).

Les deux manières de réaliser une distribution plus chaude des porteurs sont interchangeables : soit en augmentant la densité des photons absorbés, soit en augmentant l'énergie du photon. Il s'agit d'une signature claire de la domination de la diffusion transporteur-transporteur. Les résultats ont été reproduits avec l'aide d'un modèle qui prévoit que le nombre d'électrons chauds secondaires s'étend à peu près linéairement avec l'énergie des photons, d'une part, et que neuf électrons chauds supplémentaires sont créés pour chaque électron photoexcité, d'autre part ; de plus, il y a un passage d'un niveau inférieur à un niveau supérieur à l'énergie de Fermi dans la [bande de conduction](#), ce qui, par conséquent, peut contribuer à produire de l'électricité.

Les résultats indiquent que le transfert d'énergie par les transporteurs photoexcités vers d'autres transporteurs est efficace sur une large plage de fréquences allant de l'infrarouge à l'ultraviolet. Ceci place le graphène en dehors des systèmes de [semi-conducteurs](#) classiques où la gamme de fréquence est limitée par la [bande interdite](#).

De plus, il est prévu que le nombre d'électrons chauds secondaires puisse être très sensible au niveau d'un palier de dose qui peut être manipulé afin d'améliorer l'efficacité quantique et donner un transfert d'énergie acceptable sur une large plage de [spectre](#).

La théorie semble prometteuse mais, en pratique, il n'est pas facile de réaliser le plein potentiel de ce que le graphène peut atteindre dans la récupération de la lumière pour sa conversion en électricité.

## Toutes les cellules solaires à base de carbone

La tentative la plus ambitieuse de puiser dans le potentiel du graphène est la création d'une cellule solaire tout en carbone, fabriquée à partir d'une combinaison de graphène avec d'autres [allotropes de carbone](#) (formes moléculaires) qui sont entrées en lice il n'y a pas si longtemps: les [fullerènes](#) et les [nanotubes](#) de carbone.

Des dispositifs totalement à base de carbone ont déjà été présentés, tels que l'affichage des émissions de champ 'de poche' basé sur des nanotubes totalement à base de carbone [4], des transistors composés de nanotubes semi-conducteurs à simple paroi ou de nanorubans de graphène à simple paroi [5], ainsi qu'un micro-supercondensateur qui est fait complètement à partir du graphène (voir [6] ] [Graphene Micro-Supercapacitors for On-Chip Energy Storage, SiS 59](#) ) \*.

\* Version en français "Des micro-supercondensateurs au graphène pour de l'énergie sur une puce électronique" par le Dr Mae Wan Ho. Traduction et compléments de Jacques Hallard ; accessible sur le site <http://isias.transition89.lautre.net/spip.php?article327>

Des fullerènes ont été incorporés dans des dispositifs photovoltaïques organiques (OPV) depuis 1995, et la haute affinité électronique des dérivés de fullerène est couramment utilisée comme matériau accepteur dans les [dispositifs photovoltaïques organiques](#) (OPV) [7].

Une cellule solaire a été construite avec un empilement actif tout en carbone, de nanotubes semi-conducteurs à simple paroi et avec une seule [chiralité](#), comme absorbeur de lumière et donneur d'électrons, d'une part, et de fullerènes C60 comme accepteur

d'électrons, d'autre part ; le système a eu un rendement de conversion de puissance maximale de seulement 0,1% en-dessous des conditions de [test standard AM](#) (de masse d'air), de 1,5 100mW/cm<sup>2</sup> d'éclairage [7].

Un problème majeur rencontré dans la fabrication des nanotubes de carbone et des fullerènes, réside dans le fait qu'ils ne sont solubles que dans un nombre limité de solvants organiques toxiques. Une équipe dirigée par Jiaying Huang à la *Northwestern University Evanston*, dans l'Illinois aux États-Unis, a utilisé l'oxyde de graphène facilement soluble, fait par exfoliation chimique du graphite, utilisé comme agent tensio-actif, pour aider à dissoudre les nanotubes de carbone à simple paroi (SWCNT en anglais) et les fullerènes dans l'eau ; ceci entraîne une suspension colloïdale qui pourrait être appliquée par centrifugation en films minces et lisses, de 1 ou 2 nm d'épaisseur. Le 'Spin coating' est un procédé de dépôt (ou enrobage) d'un film mince uniforme sur des substrats plats. Une petite quantité de la matière de revêtement est appliquée au centre du substrat, qui est mis en rotation à grande vitesse afin de répartir la matière d'enrobage par la force centrifuge.

Pour construire une cellule solaire, une couche d'un film de '[C<sub>60</sub>/SWCNT/GO](#)' de 5-8 nm est déposée sur un oxyde d'étain et d'indium (ITO) de substrat de verre revêtu d'un film lisse de 20 nm de poly(3,4-éthylènedioxythiophène) : poly(styrène sulfonate), (soit PEDOT: PSS), en tant que couche de transport de trous. Une cuisson thermique à 150° C active les composites exposés à la lumière solaire en réduisant partiellement [GO](#) [oxyde de graphique] en graphène. Ensuite un film supplémentaire de C<sub>60</sub> est vaporisé thermiquement sur la partie supérieure, en tant que couche de blocage pour empêcher les nanotubes de carbone de faire un pont avec les électrodes opposées, et en tant que couche de transport d'électrons. Enfin, des électrodes en aluminium de 100 nm d'épaisseur ont été déposées pour compléter le dispositif. Ce dernier a donné un rendement de [conversion d'énergie](#) maximale (en anglais *Power-conversion efficiency* ou [PCE](#)) de 0,21%. En changeant de fullerène, par le remplacement de la couche de blocage en [C<sub>60</sub>](#) par du [C<sub>70</sub>](#), cela a entraîné une amélioration spectaculaire du paramètre [PCE](#) à 0,85% [8].

Tous les dispositifs au carbone sont attrayants, non seulement en raison des propriétés uniques et remarquables des allotropes du carbone, mais aussi parce que le carbone est abondant et que les allotropes peuvent être fabriqués à moindre coût : par exemple le dispositif '[roll-to-roll](#)' en feuilles qui sont prêtes à être assemblées dans les systèmes. Et, surtout, les allotropes du carbone sont très stables, plus que tout autre matériau.

Les chercheurs dirigés par Bao Zhenan à l'Université de Stanford aux États-Unis ont fabriqué une pile ou [cellule photovoltaïque](#) constituée d'une couche de fullerènes C<sub>60</sub> au-dessus d'une couche de nanotubes de carbone à paroi simple (SWCNT). Lors d'un essai avec de l'oxyde d'étain et indium (ITO) conventionnel à l'anode et une cathode métallique, la bicouche a eu une efficacité de puissance maximale de 0,45% sous un éclairage solaire standard de 1,5 AM (masse d'air) [9].

Après le remplacement des électrodes habituelles avec le graphène comme anode et des nanotubes de carbone à simple paroi et dopés comme cathode, la cellule solaire tout en carbone a un paramètre [PCE](#) de seulement 0,004% pour une illumination proche de l'infrarouge.

Jusqu'ici, les résultats obtenus à partir de toutes sortes de cellules solaires tout en carbone ne sont pas tellement impressionnants.

## Les cellules solaires à jonction Schottky avec le graphène

Des progrès ont été réalisés en utilisant du graphène dans les cellules solaires à jonction Schottky. Une [jonction Schottky](#) est formée d'un métal en contact avec un semi-conducteur de type n modérément dopé (voir encadré 1). Il est facile à faire, ne nécessite pas de matériaux rares, et il est très prometteur pour des applications dans les cellules solaires. Cependant, dans les cellules solaires conventionnelles à jonction Schottky, la couche de métal, si elle suffisamment épaisse pour former un film continu, finira par absorber la majeure partie du rayonnement solaire et par limiter l'efficacité de conversion d'énergie.

Pour contourner cette limitation, les chercheurs ont utilisé un film transparent d'oxyde d'indium-étain (ITO) pour remplacer le film métallique. Mais l'indium n'est pas abondant et le matériau ITO est fragile et il ne peut pas être utilisé pour les dispositifs flexibles. Le graphène est un substitut idéal en raison de sa nature métallique, de sa bonne tenue et de sa flexibilité [2].

Depuis le développement de procédés de déposition de vapeur chimique qui peuvent produire en masse du graphène [3], il a été constaté qu'il peut surpasser ITO comme film conducteur transparent. Différents [dispositifs photovoltaïques](#), [diodes émettrices de lumière](#), [écrans tactiles](#) et [capteurs](#) ont déjà été réalisés en utilisant le graphène synthétisé par [dépôt chimique en phase vapeur](#) (en anglais *CVD graphene chemical vapour deposition*) comme électrode transparente conductrice et flexible.

### Encadré 1

#### La cellule solaire à jonction Schottky (modifié d'après [10])

Une cellule solaire convertit la lumière en électricité. Cela se fait en générant des charges, en les séparant et en les transportant à travers un circuit électrique externe. Les charges sont générées par l'absorption des photons de la lumière solaire, mais dans le but de les séparer, il doit y avoir une force motrice intégrée dans la cellule solaire.

Dans un [semi-conducteur](#), tel que le silicium, une séparation des charges peut être obtenue par la construction d'un gradient :

- La *fonction de travail*  $f$ , l'énergie minimale nécessaire pour déplacer un électron à partir du [niveau d'énergie de Fermi](#)  $E_F$  (le potentiel électrochimique de l'électron lié) pour capter l'énergie  $E_{vac}$  (l'énergie d'un électron libre)
- L'*affinité d'électrons*, l'énergie minimale nécessaire pour déplacer un électron à partir du bas de la bande de conduction  $E_c$  vers un capteur aspirant placé à l'extérieur du semi-conducteur
- La *largeur de bande* ('*bande gap*') - la bande d'énergie où aucun électron ne peut exister : la différence entre le dessus de la bande de valence  $E_v$ , où les électrons sont liés à l'atome, et de la partie inférieure de la bande de conduction  $E_c$  où les

électrons commencent à se déplacer

- Les *densités de bande des états*, le nombre d'états par intervalle d'énergie à chaque niveau d'énergie qui peuvent être occupés par des électrons ; contrairement aux atomes isolés, les distributions de densité ne sont pas des valeurs discrètes dans un système à l'état solide, mais elles ont une variation continue.

Les trois premiers points sont importants dans les cellules solaires à hétérojonctions, dont la plus simple est une hétérojonction métal / semi-conducteur.

Un [semi-conducteur de type n](#) (dopé pour produire des électrons en excès) avec une fonction de travail  $\Phi_n$  et un métal avec une fonction de travail  $\Phi_m$ , de telle sorte que  $\Phi_m > \Phi_n$  constitue une [barrière de Schottky](#). Avant qu'elles ne forment une jonction, les bandes d'énergie du semi-conducteur et du métal sont séparées, comme cela est représenté sur la Figure 1 en haut du schéma. Quand elles sont en contact électronique, le [niveau de Fermi](#) s'aligne en raison de l'échange de porteurs de charge à travers la jonction, jusqu'à ce qu'ils entrent en équilibre (Figure 1 schéma de milieu). Les électrons diffusent à la jonction de l'extrémité n vers et dans la couche p et des trous diffusent à partir de la couche p vers et dans la couche n pour se recombinaison avec leur support de charge opposée de telle sorte que, à l'équilibre, une région de déplétion avec aucun des porteurs de charge mobiles, se forme à la jonction où les d'électrons ionisés donneurs et accepteurs s'opposent au mouvement des charges futures. L'énergie potentielle électrostatique est modifiée comme indiqué par le changement de  $E_{vac}$ , avec des changements correspondants dans la conduction et la valence des bandes d'énergie  $E_c$  et  $E_v$ . L'énergie au niveau du bord de la bande de conduction à l'interface entre le semi-conducteur et le métal est supérieure à celle qui existe dans la masse du semi-conducteur. La différence entre le bord de bande de conduction et le niveau de Fermi est intégré dans le potentiel  $V_{bi}$ .

*Figure 1 - Profils de bandes d'énergie à une hétérojonction semi-conducteur / métal : en haut avant la formation de la jonction, au milieu après la formation de la jonction et la venue de l'équilibre thermodynamique, en bas sous illumination, les électrons excités s'accumulent dans le semi-conducteur de type n, élevant le niveau électronique de Fermi et générant une tension photoélectrique,  $V$ .*

Lorsqu'ils sont éclairés par des photons d'énergie supérieure à la [bande interdite](#), les électrons s'accumulent dans le côté du semi-conducteur et les trous d'électrons dans la face métallique de la région d'appauvrissement. La lumière divise le niveau de Fermi et crée une tension photoélectrique  $V$  égale à la différence entre les niveaux de Fermi du semi-conducteur et du métal, loin de la jonction.

La [jonction de Schottky](#) la plus courante avec le graphène implique le transfert d'un film de graphène sur un semi-conducteur de silicium de type n [10, 11]. En raison de la différence entre les fonctions de travail du graphène et du semi-conducteur, un potentiel est généré dans le semi-conducteur à proximité de l'interface. Lorsqu'ils sont éclairés avec des photons énergétiques au-dessus de la bande d'énergie, les trous d'électrons et les électrons générés par la lumière sont séparés et chassés respectivement vers le film de graphène et vers la couche semi-conductrice, par le champ électrique généré (voir Figure 2).

*La figure 2 – Lorsqu'ils sont illuminés, les trous d'électrons et les électrons sont générés dans le semi-conducteur : les trous migrent vers la couche de graphène et les électrons vont vers la couche de semi-conducteur, par le champ électrique intégré*

Les cellules solaires à 'hétérojonction' de graphène et de silicium, - dans lesquelles le graphène monocouche ou peu épais est transféré sur une plaquette de silicium, puis avec un par [dopage chimique](#) du graphène -, ont atteint des rendements de 8,6% ou plus [11].

Des chercheurs de l'Université de Pékin, au Centre national pour les nanosciences et les technologies, et de l'Université de Tsinghua, toutes deux basées à Beijing, en Chine, ont récemment montré que l'efficacité d'une cellule solaire en silicium-graphène peut être améliorée de 14,5%, simplement par un traitement '*spin-coating*', d'enrobage, disposant une mince couche d'oxyde de titane TiO<sub>2</sub> au-dessus du graphène. La cellule enrobée de TiO<sub>2</sub> qui en résulte avait beaucoup amélioré les paramètres (voir encadré 2): tension en circuit ouvert  $V_{oc}$  0,612 V, courant court-circuit  $J_{sc}$  32,5 mA / cm<sup>2</sup>, coefficient de remplissage ff de 72% et un rendement quantique externe EQE jusqu'à 90% dans le spectre visible (Figure 3).

Box 2

### **Paramètres de rendement d'une cellule solaire**

Les performances des cellules solaires sont caractérisées par un certain nombre de paramètres.

- La *tension en circuit ouvert*  $V_{oc}$  est la tension atteinte en l'absence de charge externe
- Le *courant court-circuit*  $J_{sc}$  est le courant disponible quand il est court-circuité
- Le *facteur de remplissage* ff est le rapport entre la puissance maximale générée du produit  $V_{oc}$  et  $J_{sc}$

L'*énergie* ou l'*efficacité de conversion d'énergie* ECE (ou [PCE](#) en anglais) est le pourcentage de l'énergie solaire à laquelle la cellule est exposée, qui est converti en énergie électrique, calculé en divisant la puissance de sortie de la cellule en watts, à son maximum, par la lumière d'entrée en W / m<sup>2</sup> et la surface de la cellule solaire en m<sup>2</sup>.

Tout aussi important est le *rendement quantique* :

- Le *rendement quantique externe* [ou Efficacité quantique externe EQE, *External Quantum Efficiency* en anglais], est le rapport entre le nombre de porteurs de charge collectés par la cellule solaire et le nombre de photons d'une énergie donnée provenant de l'extérieur et illuminant la cellule.
- Le *rendement quantique interne* [ou Efficacité quantique interne EQI, ou *IQE Internal Quantum Efficiency* en anglais], est le rapport entre le nombre de porteurs de charge collectés par la cellule solaire et le nombre de photons d'une énergie donnée émise à l'extérieur, qui sont absorbés par la cellule.

[D'après Wikipédia : « L'**efficacité quantique**, (QE de *Quantum Efficiency* en anglais) est le rapport entre le nombre de charges [électroniques](#) collectées et le nombre de [photons](#) incidents sur une surface photoréactive. Ce paramètre permet de caractériser un composant photosensible, comme un [film photographique](#) ou un [capteur CCD](#), en termes de sensibilité électrique à la [lumière](#). L'efficacité quantique est parfois appelée aussi **IPCE** (**I**ncident-**P**hoton-to-**e**lectron **C**onversion **E**fficiency). A lire sur le site [http://fr.wikipedia.org/wiki/Efficacit%C3%A9\\_quantique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Efficacit%C3%A9_quantique) ].

*Figure 3 - Le revêtement avec du titane améliore considérablement les performances des cellules solaires au graphène et au silicium Si ; à gauche, une représentation schématique de la cellule solaire ; à droite, la variation de courant  $J$  avec la tension  $V$ .*

Le graphène monocouche utilisé a été synthétisé sur un substrat de feuille de cuivre par un dépôt chimique en phase vapeur (voir [3]) et transféré sur une plaquette de silicium monocristallin de type n, recouverte d'un oxyde d'une épaisseur de 400 nm. Le graphène a été dopé avec de l'[acide nitrique HNO<sub>3</sub>](#); puis une solution colloïdale, contenant des nanoparticules de TiO<sub>2</sub> de 3 à 5 nm de diamètre, a été appliquée par centrifugation sur le graphène avant d'être mis à sécher. Ceci laisse de minuscules fissures dans la couche de TiO<sub>2</sub>, à laquelle la couche de graphène a été exposée, et qui avait été dopée avec plus l'acide nitrique HNO<sub>3</sub>. La cellule non enrobée était transparente, reflétant près de 40% sur toute la gamme allant de 400 à 1.100 nm. Après l'enrobage, il reflète seulement environ 10% de la lumière incidente dans le spectre visible (longueur d'onde de 500 à 800 nm).

La cellule de graphène-silicium originale avait un  $V_{oc}$  inférieur à 0,4 V. Après dopage avec la vapeur d'acide nitrique HNO<sub>3</sub>, ce coefficient est passé à 0,52 V et à un facteur de remplissage  $ff$  plus élevé (65%), avec une densité de courant  $J_{sc}$  essentiellement inchangée (voir figure 1 à droite). Le paramètre  $PCE$  d'efficacité de conversion de l'énergie (voir encadré 2) a atteint 8,9% après dopage. Mais après revêtement ou enrobage avec TiO<sub>2</sub>, le paramètre  $J_{sc}$  a été amélioré de manière significative, passant de 23,9 à 32,5 mA / cm<sup>2</sup>. Et les paramètres  $V_{oc}$  et  $FF$  ont été améliorés par le dopage complémentaire avec l'acide nitrique HNO<sub>3</sub>.

En plus de la réduction de la quantité de lumière incidente qui est réfléchiée par la cellule, le revêtement de TiO<sub>2</sub> ne bloque pas le traitement acide, car il reste des fissures et cela pourrait permettre l'introduction de type p (trous) dopant le graphène, et améliorant ainsi le paramètre  $V_{oc}$ .

La cellule composite TiO<sub>2</sub> - G - Si [oxyde de titane, graphène et silicium] a montré une performance constante sous une intensité variable de la lumière.

© 1999-2013 The Institute of Science in Society

[Contact the Institute of Science in Society](#)

MATERIAL ON THIS SITE MAY NOT BE REPRODUCED IN ANY FORM WITHOUT EXPLICIT PERMISSION. FOR PERMISSION, PLEASE [CONTACT ISIS](#)

**Traduction, compléments entre [...] et inclusion des liens donnant accès à des définitions**



Jacques Hallard, Ing. CNAM, consultant indépendant.

Relecture et corrections : Christiane Hallard-Lauffenburger, professeur des écoles.

Adresse : 585 Chemin du Malpas 13940 Mollégès France

Courriel : [jacques.hallard921@orange.fr](mailto:jacques.hallard921@orange.fr)

Fichier : ISIS Energie **Graphene and Solar Power for the Masses** French version.2

---