

# Énergies renouvelables : énergie solaire photovoltaïque

Josselin Fatah-Roux

Université de Toulon  
Master 2 Physique Science de l'Ingénieur  
Spécialité Physique Surveillance de l'Environnement  
vufic@outlook.com

19 janvier 2018

## Résumé

Le soleil véritable réacteur à fusion nucléaire est une source gigantesque d'énergie dont la partie qui frappe la terre est 10 000 fois supérieur à la demande énergétique globale de la population. Bien que les astronomes prédisent l'extinction de celui-ci dans 5 milliards d'années il n'en reste pas moins à l'échelle humaine une réserve inépuisable. Par conséquent pouvoir ne serait que récupérer une infime partie de l'énergie reçue est donc primordiale dans une période où les énergies fossiles visent à disparaître.

Ce travail consiste tout d'abord en une bref présentation du potentiel solaire. Il s'en suivra une description détaillée du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque ainsi que ses avantages et limites. Enfin il sera question de montrer quelques innovations en la matière. Les résultats exploités dans ce rapport tendent à indiquer que le photovoltaïque est une technologie d'avenir.

## Mots-clés

Énergies fossiles ; Pollution ; Réchauffement climatique ; Énergies renouvelables ; Potentiel solaire ; Énergie solaire photovoltaïque ; Fonctionnement ; Recherche et innovation

## 1 Introduction

L'énergie est indispensable à toute vie qu'elle soit animal, végétale ou même bactérienne. Elle revêt une importance encore plus capital pour l'homme en raison d'un aspect supplémentaire : le développement économique et sociétale. En effet l'humain cherchant sans cesse à évoluer techniquement en vue d'améliorer son bien être-social.

À l'heure actuelle les énergies fossiles (charbon, gaz naturel, pétrole) sont les plus convoitées et utilisées (environ 80% de la consommation mondiale). Cela s'explique par le fait qu'elles sont non seulement transportables mais également stockables. Néanmoins leur quantité est limitée sur Terre. La raréfaction de ces ressources dû à un usage intensif fait craindre une pénurie à terme.

Pour pallier à cette limitation il existe des énergies dites renouvelables (eau, vent, soleil, géothermie et plantes). Elles sont considérées comme inépuisables car leur réserve ne diminue pas ou se reconstitue à une échelle de temps humaine. De plus celles-ci ne produisent quasiment pas ou très peu de pollution. Dans une période où le réchauffement climatique est un problème majeur, les énergies renouvelables - jouant d'un double intérêt - semblent être la meilleure solution.

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Le potentiel solaire</b>	<b>3</b>
2.1	Constante solaire (hors atmosphère) . . . . .	3
2.2	Constante solaire moyenne (terre $\approx$ sphère) . . . . .	4
2.3	Constante solaire (avec atmosphère) . . . . .	4
2.4	Ensoleillement mondiale . . . . .	4
<b>3</b>	<b>L'énergie solaire photovoltaïque</b>	<b>5</b>
3.1	Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque . . . . .	5
3.2	Inclinaison optimum d'une cellule photovoltaïque . . . . .	8
3.3	Avantages et limites . . . . .	9
<b>4</b>	<b>Quelques innovations intéressantes</b>	<b>9</b>
4.1	Le Flexible Waveguiding Photovoltaics : une innovation technologique permettant de maximiser la surface exploitable . . . . .	9
4.2	Le beta.ray de Rawlemon : une innovation technologique visant à rendre plus performant les systèmes existants . . . . .	9
4.3	Les pérovskites : une innovation visant à rendre les panneaux plus efficaces grâce aux matériaux employés . . . . .	10
<b>5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>10</b>

## 2 Le potentiel solaire

### 2.1 Constante solaire (hors atmosphère)

Le soleil de rayon  $R_s$  est situé à une distance  $d$  de la terre de rayon  $R_T$ . On considère que le soleil rayonne comme un corps noir à une température  $T_s$ .

Le soleil rayonne la densité de puissance :

$$P_s = \sigma T_s^4 \text{ (Loi de Stefan)}$$

La puissance totale émise est :

$$P = P_s \times 4\pi R_s^2$$

À une distance  $d$  du soleil, la densité de puissance reçue (en l'occurrence la densité de puissance reçue au sommet de l'atmosphère) est :

$$C = \frac{P}{4\pi d^2} \Leftrightarrow C = \frac{\sigma T_s^4 R_s^2}{d^2}$$

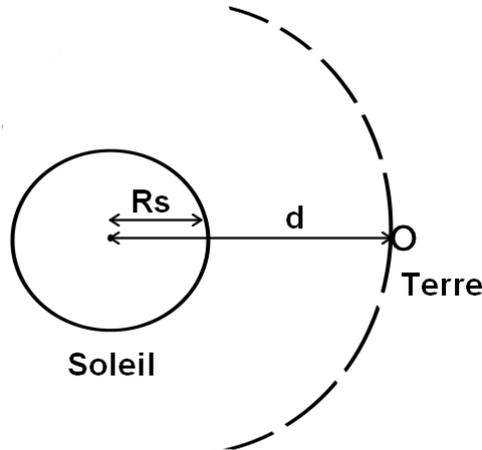


FIGURE 1 – Calcul de la constante solaire  $C$

Sachant que  $T_s = 5777K$ ,  $R_s = 696000 \times 10^3 m$ ,  $d = 1.5 \times 10^{11} m$  et  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$  :

$$P = 3.84 \times 10^{26} W \text{ et } C = 1360 W.m^{-2}$$

Ainsi on a une puissance totale rayonnée par le soleil de  $3.84 \times 10^{23} kW$  (environ 6 million de tonnes de matières transformées en énergie par seconde et un millième de sa masse théoriquement consommée en 5 milliards d'années).

Si l'on considère la terre comme un disque avec  $R_T = 6371 \times 10^3 m$  alors l'énergie qu'elle reçoit est d'environ :

$$P_T = C \times \pi R_T^2 \Leftrightarrow P_T = 1.73 \times 10^{17} W \Leftrightarrow P_T = 1.73 \times 10^{17} * 24 * 365 Wh$$

$$P_T = 1.519 \times 10^{21} Wh$$

La consommation énergétique mondiale en 2011 était de  $12274 Mtep$  [6] ( $1tep = 1,163 \times 10^7 Wh$ ) soit  $1.43 \times 10^{17} Wh$ , par conséquent 10000 fois inférieur à ce que le soleil fournit à la terre pour la même période.

## 2.2 Constante solaire moyenne (terre $\approx$ sphère)

Bien qu'il a été décidé de représenter la terre comme un cercle celle-ci est en réalité une sphère. On considère  $C_{moy}$  une densité de puissance moyenne au sommet de l'atmosphère, la même puissance  $P_T$  est :

$$P_T = C_{moy} \times 4\pi R_T^2 \text{ d'où } C_{moy} \times 4\pi R_T^2 = C\pi R_T^2 \Leftrightarrow C_{moy} = \frac{C}{4}$$

$$\boxed{C_{moy} = 340W.m^{-2}}$$

Il est à noter que cela ne change strictement rien au  $P_T$  calculé précédemment car la quantité d'énergie provenant du disque a été distribuée sur une sphère. Néanmoins cela change du point de vue des  $W.m^{-2}$ .

## 2.3 Constante solaire (avec atmosphère)

L'atmosphère est un facteur à prendre en compte car il réfléchit vers l'espace en moyenne 30% (albédo  $A=0.3$ ) du flux solaire lui arrivant (les 70 autres pourcent étant alors absorbés).

L'équilibre radiatif implique que la puissance du rayonnement solaire absorbée par le système terre-atmosphère s'équilibre avec la puissance perdue par ce même système :

$$P_{\text{absorbé par la terre/atmosphère}} = P_{\text{perdue par l'atmosphère}}$$

On connaît  $P_{\text{absorbé par la terre/atmosphère}}$  :

$$P_{\text{absorbé par la terre/atmosphère}} = (1 - A)C\pi R_T^2$$

Considérant la terre semblable à un corps noirs et le rayon de l'atmosphère équivalent au rayon de la terre, on a  $P_{\text{perdue par l'atmosphère}}$  égale à :

$$P_{\text{perdue par l'atmosphère}} = 4\pi R_T^2 \sigma T_E^4$$

L'égalité des deux équations donnant  $T_E$  :

$$T_E = \left( \frac{(1 - A)C}{4\sigma} \right)^{\frac{1}{4}} \Leftrightarrow T_E = 254.5K$$

Ainsi la constante solaire corrigée des effets de l'atmosphère vaut :

$$C_{corr} = \sigma T_E^4$$

$$\boxed{C_{corr} = 237.9W.m^{-2}}$$

On démontre bien que l'atmosphère réduit le flux solaire arrivant sur terre.

## 2.4 Ensoleillement mondiale

Les constantes calculées précédemment sont purement théoriques et approximatives. En effet mathématiquement elles sont justes mais physiquement de nombreux paramètres sont négligés. Par exemples il n'est pas pris en compte la possibilité de nuages, ni de l'inclinaison de la terre. Mais surtout ce sont des constantes qui appliquent la même valeur moyenne en tout point du domaine! Le flux solaire n'étant pas le même aux pôles qu'à l'équateur. Toutefois elles restent une bonne indication sur l'ordre de grandeur.

La carte ci-dessous montre pour chaque région l'ensoleillement :

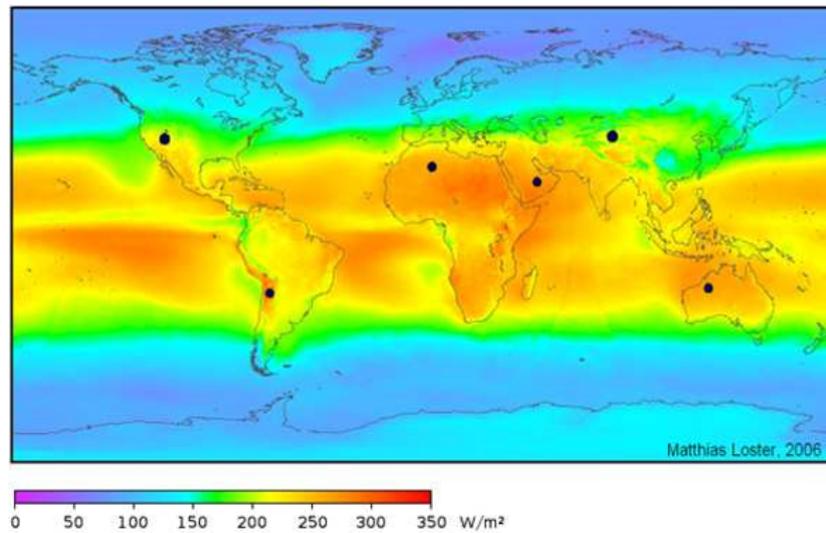


FIGURE 2 – Ensoleillement pour chaque région (Source : energie-paca.com)

On constate très clairement l'inégalité du rayonnement reçu avec en particulier une concentration dans la zone de l'équateur et une déperdition aux niveaux des pôles.

### 3 L'énergie solaire photovoltaïque

#### 3.1 Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Le premier constituant à la base de toute cellule photovoltaïque est le silicium extrait de la silice contenue dans le sable. Cet élément est un semi-conducteur qui a la capacité d'absorber la lumière mais également à générer un champ et une tension électrique. Bien que ce ne soit pas le seul semi-conducteur qui existe et qui puisse être utilisé il reste néanmoins celui qui a le plus la cote de part son faible coût dû à son abondance sur terre.

Lorsque le silicium est en contact avec la lumière, les électrons de chaque atome se mettent à bouger dans tous les sens passant d'un atome à l'autre. Cela ne suffit pourtant pas à créer un courant électrique car la circulation des électrons ne se fait pas dans un sens bien précis. Pour pallier à ce problème il faut séparer la cellule photovoltaïque en deux couches dont l'une va être dopée avec un premier constituant et l'autre par un deuxième constituant. Le dopage consistant à insérer des impuretés qui vont permettre d'améliorer la conductivité :

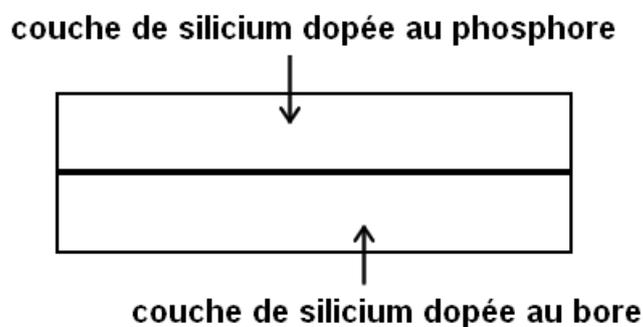
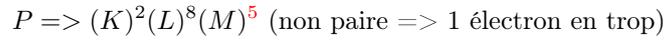
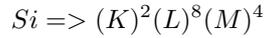


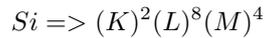
FIGURE 3 – Dopage des deux couches

La première couche est donc dopée au phosphore qui contient plus d'électrons sur sa périphérie que le silicium (5 contre 4) :



L'électron en plus ne participant pas aux liaisons peut en conséquence se déplacer librement. Ainsi la couche est susceptible de libérer des électrons mobile, on la nomme alors couche N car la charge mobile est négative.

La seconde couche est dopée au bore qui contient moins d'électrons sur sa périphérie que le silicium (3 contre 4) :



Il manque ainsi un électron au bore pour la réalisation de ses liaisons - laissant un trou d'électron qui est mobile et de charge positive. La couche est alors appelée couche P car elle susceptible de libérer des trous mobile qui sont justement de charge positive.

À la jonction des deux couches, par diffusion, les électrons excédentaires vont combler les trous. Ce phénomène va créer une zone non neutre électriquement d'atomes de phosphore chargés positivement et une zone non neutre d'atomes de bore chargés négativement, créant en ce lieu un champ électrique :

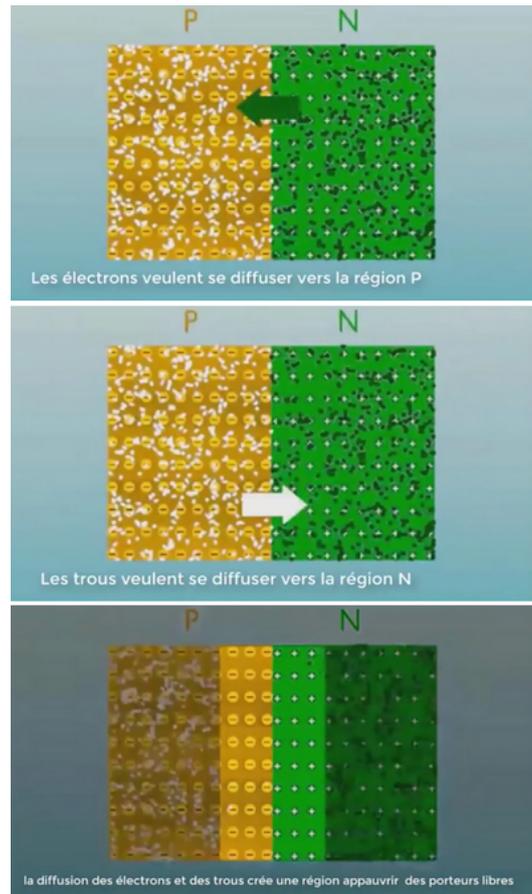


FIGURE 4 – Jonction PN (Source : [youtube.com/watch?v=ll313\\_OKc3o](https://www.youtube.com/watch?v=ll313_OKc3o))

Lorsque la lumière du soleil atteint la cellule photovoltaïque les photons de celle-ci transmettent leur énergie aux électrons qui vont pouvoir s'arracher de leur atome laissant donc des trous. Les trous et les électrons vont ainsi avoir tendance à se recombiner. Néanmoins lorsque le phénomène à lieu dans ou aux alentours de l'interface PN, le champ électrique s'y trouvant va repousser d'un coté les charges négatives et de l'autre les charges positives :

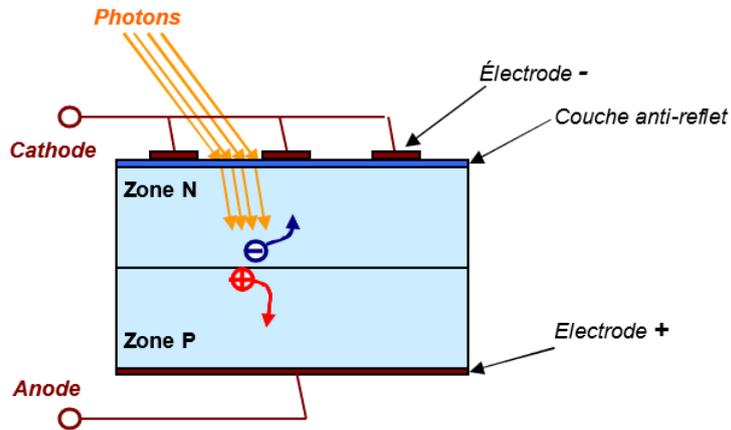


FIGURE 5 – Séparation des charges (Source : laude.lahache.free.fr)

Les charges négatives étant renvoyées dans N et les charges positives dans P.

Il ne reste plus qu'à disposer deux bornes (l'une sur N et l'autre sur P) reliées par un fil conducteur permettant l'évacuation extérieur des électrons vers les trous. Cette circulation générant un courant appelé photocourant qui peut être récupéré :

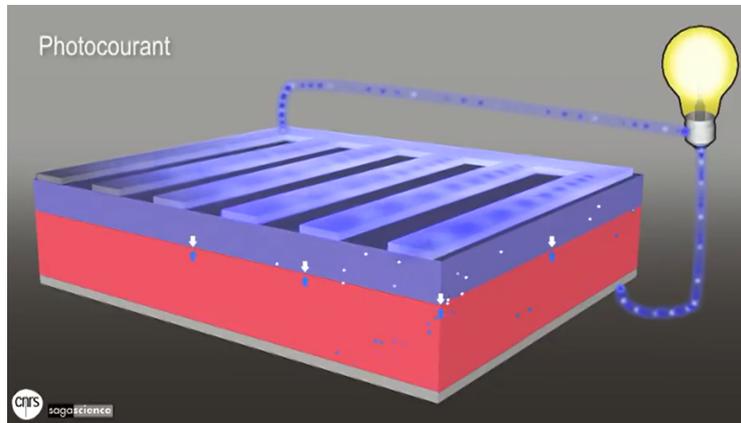


FIGURE 6 – Photocourant (Source : youtube.com/watch?v=23i-\_v\_tWTA)

La tension à la jonction PN est nommée phototension. Le produit du photocourant et de la phototension donne la puissance électrique :

$$\text{Photocourant} \times \text{Phototension} = \text{Puissance électrique}$$

Enfin le rapport de l'énergie de la lumière et de l'énergie électrique correspond au rendement de conversion de la cellule :

$$\frac{\text{Énergie de la lumière}}{\text{Énergie électrique}} = \text{Rendement de conversion de la cellule}$$

### 3.2 Inclinaison optimum d'une cellule photovoltaïque

L'inclinaison d'une cellule photovoltaïque (rectangulaire) est un facteur important à prendre en compte car il influe directement sur le rendement.

Cellule photovoltaïque perpendiculaire aux rayons du soleil :

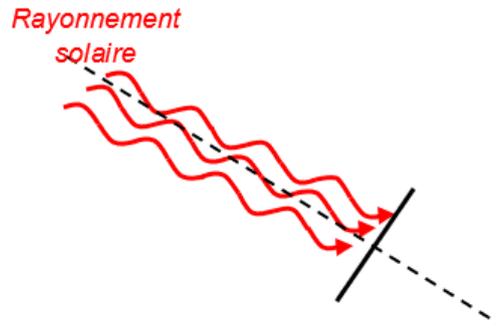


FIGURE 7 – Cellule perpendiculaire aux rayons (Source : laude.lahache.free.fr)

Le capteur plan placé perpendiculairement au rayonnement solaire reçoit une puissance :

$$P_{\text{non incliné}} = P_s \times S$$

où  $P_s$  est le flux solaire moyen sur un  $m^2$  et  $S$  la surface du capteur.

Cellule photovoltaïque inclinée par rapport aux rayons du soleil :

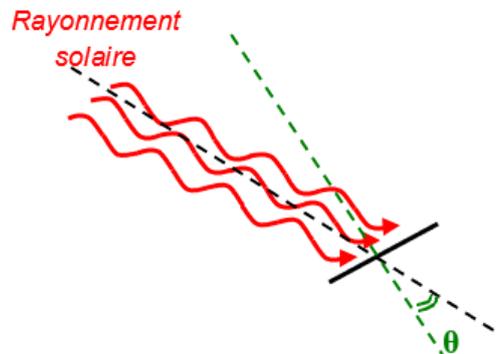


FIGURE 8 – Cellule non perpendiculaire aux rayons (Source : laude.lahache.free.fr)

Si maintenant le capteur est incliné d'un angle  $\theta$  par rapport au rayonnement solaire alors celui-ci reçoit cette fois-ci une puissance :

$$P_{\text{incliné}} = P_s \times S \times \cos(\theta)$$

Ce qui est forcément inférieur à  $P_{\text{non incliné}}$  car  $-1 \leq \cos(\theta) \leq 1$ .

Ainsi pour qu'un capteur plan solaire est un rendement maximal il doit toujours être perpendiculaire à la lumière. Plus il s'incline et plus le rendement décline. Toute la complexité est d'ailleurs là dans la réalité puisque l'inclinaison des rayons solaire en un point de la terre dépend de l'inclinaison de la terre. Les solutions envisageables sont alors soit de trouver un compromis sur l'orientation du capteur fixe ou soit munir ce capteur d'un dispositif de poursuite "tracker".

### 3.3 Avantages et limites

Le tableau ci-après présente les avantages et limites du photovoltaïque :

Avantages	Limites
Énergie solaire : inépuisable et gratuit	Coût de production élevée : de 70 à 90 \$/MWh
Photovoltaïque : non polluant en terme d'exploitation	Photovoltaïque une technologie : lourde et fragile
Le silicium : abondant et non toxique	Rendement faible $\approx 10\%$ pour le grand public
Photovoltaïque une technologie : silencieuse	Inclinaison à adapter aux rayons du soleil
Durée de vie d'une cellule photovoltaïque $\approx 30$ ans	Production d'électricité que le jour
Photovoltaïque recyclable (hors batteries)	Stockage d'électricité difficile car intermittent

## 4 Quelques innovations intéressantes

### 4.1 Le Flexible Waveguiding Photovoltaics : une innovation technologique permettant de maximiser la surface exploitable



FIGURE 9 – Les sphères Rawlemon ([Source : univers-nature.com](http://univers-nature.com))

Ce module transparent créé par la société Flexwave est constitué d'un mélange de cellules solaires de silicium et du polydiméthylsiloxane (polymère) lui donnant une consistance de silicone. Lorsque les rayons lumineux frappent le module, ils se dispersent et se diffusent vers les cellules solaires installées sur les côtés de celui-ci. Cette configuration permet de conserver la flexibilité de l'ensemble.

### 4.2 Le beta.ray de Rawlemon : une innovation technologique visant à rendre plus performant les systèmes existants



FIGURE 10 – Flexible Waveguiding Photovoltaics ([Source : bearingpoint.com](http://bearingpoint.com))

L'idée de l'architecte allemand A. Brössel pour pallier au faible rendement du photovoltaïque a été d'utiliser une sphère translucide remplie d'eau faisant office de loupe en concentrant l'énergie solaire sur les quelques centimètres carrés de capteurs photovoltaïques. Le rendement atteignant alors 35% de plus qu'un panneau photovoltaïque classique, la sphère pouvant même produire de l'énergie lors de la pleine lune.

### 4.3 Les pérovskites : une innovation visant à rendre les panneaux plus efficaces grâce aux matériaux employés



FIGURE 11 – Les pérovskites (Source : batiactu.com)

D'après les récentes recherches, les pérovskites avec un rendement actuel de 22% pourraient à terme remplacer le silicium qui suite à la hausse de la demande risque de manquer dans les prochaines décennies. La combinaison du silicium et des pérovskites permettrait même d'atteindre les 35% de rendement. Toutefois les pérovskites contiennent du plomb, pouvant nuire à l'environnement.

## 5 Conclusion

Dans cette étude il a été possible de constater le potentiel énorme du soleil en terme d'énergie reçu sur terre. La technologie photovoltaïque permettant ainsi d'en récupérer une partie qui pour l'instant reste encore faible. Néanmoins au vue des progrès dans le domaine il n'y a nul doute qu'elle a de l'avenir.

## Références

- [1] ASTIER, STÉPHAN. 2008. *Du rayonnement solaire à la cellule photovoltaïque.*
- [2] DOS REIS, ANTHONY. 2016. *Panorama des innovations solaires.*
- [3] LAHACHE, CLAUDE. 2010. *Le potentiel solaire, le solaire thermique et photovoltaïque.*
- [4] CRONFALT, FLORIAN. 2009. *Avantages et inconvénients du photovoltaïque.*
- [5] DEGUEIL, SERGE. 2015. *Comparaison des moyens de production d'électricité.*
- [6] FINLEY, MARK. 2013. *BP statistical review of world energy.*
- [7] LAHOREAU, GAËLLE. 2014. *Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.*