

Cellules photovoltaïques

De la couche active au panneau solaire photovoltaïque

Abdelhamid Benhaya
Département d'Electronique, Faculté de Technologie
Université Batna 2
Batna, Algérie
a.benhaya@univ-batna2.dz

Résumé— Dans le présent document, nous nous intéressons aux cellules photovoltaïques en présentant un tour d'horizon sur ces dispositifs électroniques depuis la couche active, constituant le milieu absorbeur, jusqu'à leur association dans des modules pour fournir l'énergie requise par une installation. En premier lieu, nous donnons un bref survol des aspects généraux et du vocabulaire de base utilisés dans ce domaine, puis nous abordons le volet concernant les matériaux et la conversion photovoltaïques ainsi que les technologies retenues pour réaliser ces cellules. En second lieu, nous présentons les techniques de caractérisation utilisées pour contrôler la qualité des cellules réalisées ainsi que leur association en modules pour pouvoir générer des tensions et des courants utilisables en pratique. Pour finir, nous donnons quelques résultats récents et les prévisions d'une feuille de route proposée dans ce domaine.

Mots clés— Cellules photovoltaïques; énergie renouvelable; couche active; matériaux photovoltaïques

I. INTRODUCTION

La crise énergétique des années soixante dix et la baisse des ressources énergétiques conventionnelles tels que le charbon, le pétrole, le gaz, ...etc., a conduit à la recherche de nouvelles sources durables. Ce type de sources, appelées énergies renouvelables, sont fournies par le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau, les marées ou encore la croissance des végétaux (biomasse). L'énergie la plus prometteuse, parmi les différentes énergies renouvelables, est l'énergie solaire photovoltaïque produite par la conversion directe du rayonnement solaire en énergie électrique, grâce à un composant électronique appelé cellule photovoltaïque. Nous présentons, dans les sections qui suivent, une vue d'ensemble sur ce composant "cellule photovoltaïque" dont dépend l'avenir de l'humanité sur le plan énergétique.

II. ASPECTS GÉNÉRAUX

A. Signification du mot photovoltaïque

Le terme photovoltaïque est composé des mots:

- Photo = lumière,
- Volt = unité de tension électrique.

C'est le terme utilisé pour désigner l'électricité produite à partir de l'énergie solaire. Autrement dit, photovoltaïque signifie que l'énergie solaire est transformée en tension électrique

B. Différentes sources d'énergies

Sur la planète terrestre, il existe deux types de sources d'énergies utilisées par l'être humain pour subvenir à ses besoins. Il s'agit des énergies conventionnelles, appelées énergies non renouvelables, et les énergies durables appelées énergies renouvelables.

1) Energies non renouvelables

Une source d'énergie est dite non renouvelable dans le cas où elle est incapable de se renouveler. Les sources d'énergies non renouvelables utilisées de nos jours sont: le charbon, le pétrole, le gaz et l'uranium.

2) Energies renouvelables

Une source d'énergie est dite renouvelable dans le cas où elle est capable de se renouveler assez rapidement. Les sources d'énergies renouvelables qu'on a commencé à utiliser depuis quelques décennies sont: l'énergie solaire et l'énergie éolienne.

C. Historique du photovoltaïque

- En 1839, Becquerel découvrit l'effet photovoltaïque qui permet la transformation directe de l'énergie lumineuse en électricité [1];

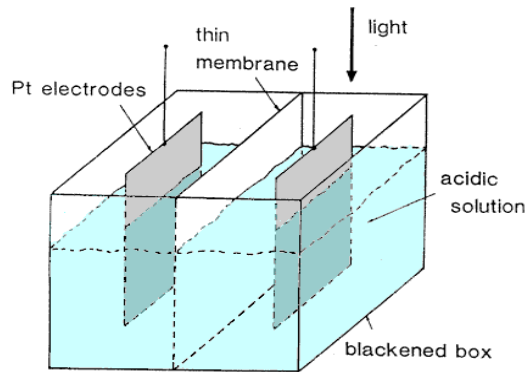


Figure 1. Le dispositif qui a permis à Becquerel L'effet photovoltaïque

- Fritts (1883) et Grondahl (1930-32), proposèrent les premiers dispositifs photovoltaïques avec un rendement de 1% [2];

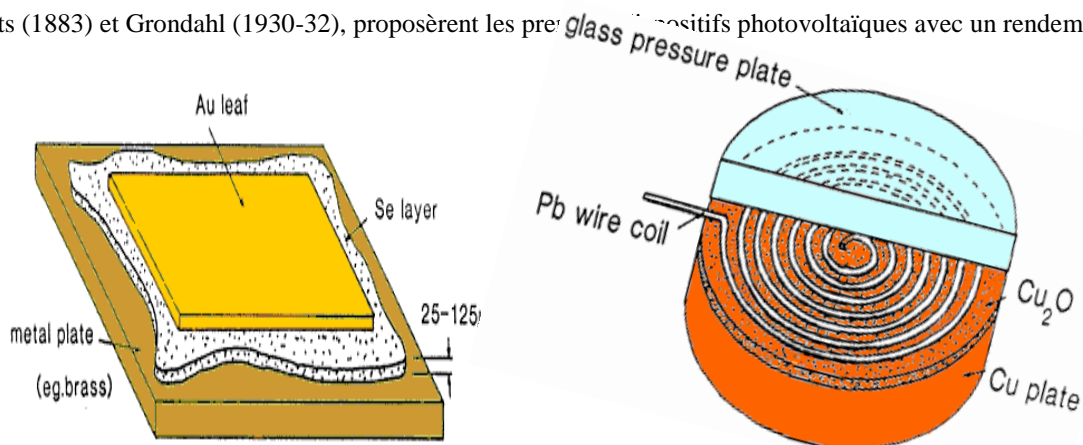


Figure 2. Les premiers prototypes proposés, par Fritts (à gauche) et Grondahl (à droite)

- En 1954, Pearson, Chapin, et Fuller, mirent au point une première cellule photovoltaïque (jonction pn à base du silicium cristallin) avec un rendement de conversion de l'ordre de 6% [2,3].
- En 1958, les premières cellules, fixées à l'extérieur du satellite Vanguard, ont été envoyées dans l'espace pour alimenter l'un des deux émetteurs radioélectriques embarqués à bord du satellite et affichaient un rendement de 9%;
- En 1959, les premiers panneaux solaires attachés sur le satellite Explorer 6 ont été lancés dans l'espace;
- A partir de 1970, les premières utilisations terrestres ont concerné l'électrification des sites isolés;
- En 1973, la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware;
- En 1983, la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie;
- A partir des années 1990, l'usage des cellules photovoltaïques et des panneaux solaires s'est démocratisé un peu grâce à une diminution progressive de leur coût;
- Actuellement, la recherche s'intéresse aux polymères et matériaux organiques (éventuellement souples) susceptibles de remplacer le silicium et les autres matériaux inorganiques [9].

D. Motivation pour les énergies renouvelables

Contrairement aux sources des énergies renouvelables, les sources d'énergie non renouvelables sont en voie d'extinction et très polluantes. En effet, on estime que la quantité de CO2 dégagée dans l'atmosphère est de l'ordre de $20 \cdot 10^{20}$ kg/an. Cette pollution a conduit à une montée de la température du globe terrestre de 0.3 à 0.6 °C depuis la fin du 19ème siècle, ce qui a conduit à son tour à la montée des eaux de la mer de 10 à 25 cm.

E. Spectre solaire

Le soleil envoie son énergie sous forme électromagnétique qui s'étale sur toute une gamme de longueurs d'onde (0.2 à 3 µm, si on se limite à celles qui arrivent sur terre).

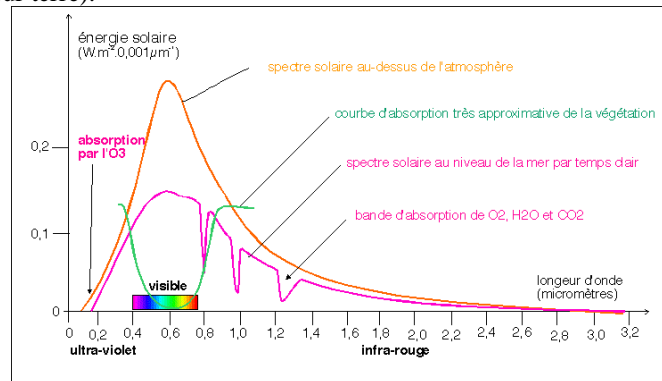


Figure 3. Le spectre solaire

F. Grandeurs associées au spectre solaire [4]

1) Eclairage spectral (I_λ) (spectral irradiance)

C'est la puissance reçue par une surface unité dans la gamme spectrale de largeur $d\lambda$ (W/(m² µm)).

2) Eclairage (Irradiance)

C'est l'intégrale de l'éclairage spectral sur le domaine spectral d'intérêt (W/m²).

3) Rayonnement

C'est l'intégrale dans le temps de l'éclairage sur une période donnée (J/m² -jour ou kWh/ m² -jour ou kWh/ m² -mois ou kWh/ m² -an)

4) Air mass

La distribution spectrale du rayonnement solaire dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Pour unifier les méthodes de test des performances de cellules photovoltaïques élaborés dans les différents laboratoires du monde, on a institué la notion d'air mass qui traduit le degré d'atténuation, par l'atmosphère, de la lumière du soleil reçue sur la surface de la terre. L'air mass est donné par l'expression ci-dessous [5] où z est l'altitude et θ est l'angle entre la normale et le vecteur position du soleil comme il est indiqué dans la Fig. 4.

$$AM = \frac{e^{-\frac{z}{7.8}}}{\cos(\theta)} \tag{1}$$

Hors atmosphère, qui correspond à $z \rightarrow \infty$, on a $AM=0$ quelque soit θ et ce cas correspond à $AM0$. Au niveau de la mer ($z=0$) quand le soleil est au zénith ($\theta=0$), on a $AM1$. Les différents cas rencontrés en pratique sont résumés dans le tableau ci-dessous. Notons que pour les tests au laboratoire, on utilise le spectre $AM0$ pour les cellules destinées aux applications spatiales et les spectres $AM1$ ou $AM1.5$ pour les cellules destinées aux applications terrestres pour lesquelles la cellule est supposée placée au niveau de la mer ($z=0$) dans des conditions d'éclairage correspondant à un ciel bien clair et dégagé sous un soleil de plein midi au zénith ($\theta=90^\circ$) pour $AM1$ ou d'inclinaison $\theta=42^\circ$ pour $AM1.5$.

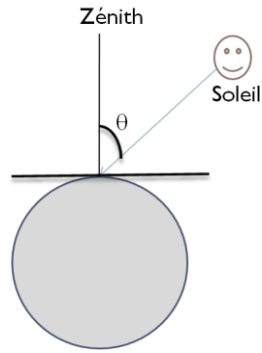


Figure 4. Définition de l'air mass

TABLE I. VALEURS DE L'AIR MASS UTILISÉES EN PRATIQUE

Air mass	Conditions	Eclairement (W/m ²) [3]
AM0	hors atmosphère ($z \rightarrow \infty$),	1353
AM1	Soleil au zénith ($\theta=0$) et au niveau de la mer ($z=0$):	925
AM1.5	Soleil au zénith ($\theta=42^\circ$) et au niveau de la mer ($z=0$):	844

G. Ensoleillement à travers les différents pays du monde

Pour mettre en évidence l'importance de l'énergie solaire, il est à rappeler que la quantité totale d'énergie solaire reçue au niveau du sol pendant une semaine est supérieure à l'énergie produite par les réserves mondiales de charbon, de pétrole, de gaz et d'uranium [6]. Le tableau ci-dessous résume l'ensoleillement pour quelques pays.

TABLE II. ENSOLEILLEMENT DANS QUELQUES PAYS

Pays	Ensoleillement (kWh/m ² /jour) [6]
Nord Australie et au Botswana	7
Algérie	5.6 (Hauts plateaux) à 6.5 (sud)
Espagne	3
Sud Suède	<1

H. Problèmes à résoudre

Les industriels dans le domaine photovoltaïque ont deux défis à relever. Ils doivent à la fois fabriquer des dispositifs de conversion efficaces et des moyens de stockage à des prix abordables pour démocratiser l'utilisation de cette énergie. Dans ce contexte, la recherche s'oriente sur deux principaux axes:

- Augmenter le rendement et diminuer les coûts de production du dispositif de conversion;
- Mettre au point des moyens de stockage adéquats.

III. MATÉRIAUX PHOTOVOLTAÏQUES

A. Exigences

Le matériau photovoltaïque doit avoir un coefficient d'absorption important pour diminuer l'épaisseur de la couche active et contribuer ainsi à réduire le prix de revient du convertisseur. Il doit aussi posséder un gap direct pour favoriser les transitions radiatives dans le but d'avoir une conversion photovoltaïque efficace [2].

B. Matériaux utilisés

1) Silicium

Le matériau le plus utilisé est le silicium, car il est abondant, non toxique, technologie maîtrisée et aussi pour la qualité de son oxyde [6]

2) Tellurure de cadmium

Ce matériau permet de fabriquer des cellules avec un rendement qui peut atteindre 18 % au laboratoire. Son avantage principal est le prix réduit, car on peut produire un panneau en 2h30 avec de petites pertes de matière première estimées à seulement 2 %. Son inconvénient principal est la présence du cadmium nocif à l'environnement et la rareté du tellure [1].

3) Matériaux composés

On utilise ces derniers temps les composés CIGS [7] et CZTS [8] comme matériaux absorbants. Les rendements atteints avec ces matériaux sont de l'ordre 20 % pour CIGS et 12% pour CZTS. Les principaux inconvénients sont la rareté de l'indium pour CIGS et la présence de phases secondaires pour les deux cas.

4) Matériaux pérovskites

Ces matériaux sont de la forme $(\text{CH}_3\text{NH}_3 \text{ M X}_3)$ avec $\text{M}=\text{Pb}$ ou Sn et $\text{X}=\text{Cl}$, Br ou I . Un exemple typique est $\text{CH}_3\text{NH}_3 \text{ PbI}_3$. Leurs principaux avantages sont le bon rendement, de l'ordre de 19 % au laboratoire, un gap typique (1.5-1.6 eV), modes de synthèse faciles et à bas coût et les éléments chimiques sont abondants. Cependant, il reste quelques problèmes à résoudre tels que le remplacement du Pb par Sn, amélioration de la stabilité et trouver la technologie de dépôt la plus appropriée.

5) Matériaux Organiques

On utilise des matériaux à base de colorants ou de polymères [9]. Le rendement atteint avec ces matériaux est de l'ordre de 10 % pour les cellules au laboratoire mais ne dépasse pas les 5% pour les modules en service. Le principal inconvénient de ces matériaux est l'instabilité à long terme.

IV. CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE

On entend par l'expression "conversion photovoltaïque" les mécanismes impliqués dans la transformation de l'énergie solaire en énergie électrique. Les mécanismes mis en jeu sont (Voir Fig.5):

- Absorption, par le matériau, des photons dont $h\nu > E_g$;
- Création des paires électron/trou;
- Collecte des porteurs créés en les séparant par le champ interne du dispositif (champ jonction ou hétérojonction);
- Circulation des porteurs dans le circuit externe pour alimenter la charge.

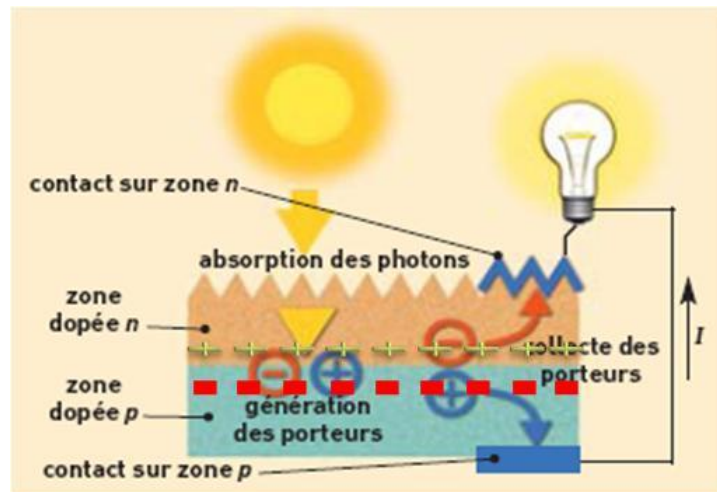


Figure 5. Mécanismes impliqués dans la conversion photovoltaïque

V. ASPECTS TECHNOLOGIQUES

A. Différentes générations de cellules photovoltaïques

Il y a trois générations de cellules photovoltaïques.

1) Cellules de première génération

Elles sont fabriquées principalement en silicium massif, c'est à dire des wafers dont l'épaisseur est de l'ordre de 0.5 mm.

2) Cellules de deuxième génération

Elles sont préparées à partir d'un film mince (environ 10 micromètres), de silicium ou des autres matériaux exposés ci-dessus, déposé sur un substrat moins cher (des plaquettes de verre ou de céramique).

3) Cellules de troisième génération

Elles sont à base de cellules multicouches, de l'électronique imprimé (cellules à colorants) ou celles à base de nanoparticules de silicium ou de germanium (5 nanomètres de diamètre) implantées dans une fine couche de verre placée à la surface de la cellule pour que la lumière solaire soit mieux absorbée.

B. Différentes structures

Comme il a été mentionné ci-dessus, la séparation des paires électrons trous ne peut avoir lieu que lorsqu'il existe un champ interne. Ce champ provient de la juxtaposition de couches dopées différemment ou ne sont pas de même nature chimique. C'est la raison pour laquelle on utilise des jonctions ou des hétérojonctions pour développer ce champ interne. On réalise des cellules photovoltaïques sous formes de jonction pn, de structure Schottky ou MIS [2] pour exploiter le champ électrique interne de ces structures comme il est illustré dans la Fig. 5 dans le cas d'une jonction pn.

VI. CARACTÉRISATION DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

Il existe principalement deux techniques électro-optiques pour caractériser les cellules photovoltaïques [6, 10].

- La première technique consiste à mesurer la caractéristique I(V) sous un rayonnement polychromatique.
- La deuxième consiste à mesurer la réponse spectrale sous un rayonnement monochromatique

A. Paramètres électriques d'une cellule photovoltaïque

Une fois la caractéristique I(V) obtenue Fig.6, on peut déduire les paramètres suivants:

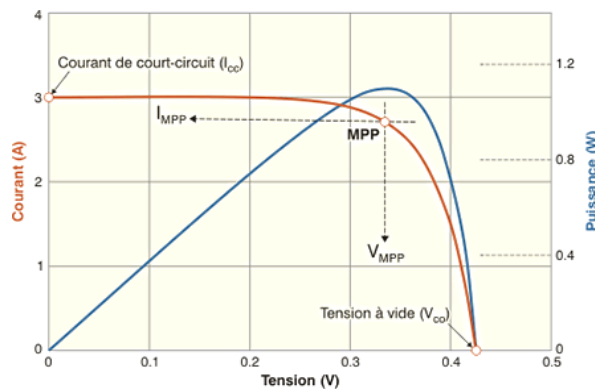


Figure 6. Paramètres d'une cellule photovoltaïque

- **I_{cc}**: courant de court-circuit
- **V_{co}**: tension en circuit ouvert
- **I_{MPP}**: courant à la puissance maximale
- **V_{MPP}**: tension à la puissance maximale
- **P_M**: puissance maximale délivrée à la charge et est donnée par:

$$P_M = V_{MPP} \times I_{MPP}$$
- **FF**: Facteur de forme défini par:

$$FF = (V_{MPP} \times I_{MPP}) / (V_{CO} \times I_{CC})$$
- **η**: rendement défini par le rapport : $\eta = P_M / P_i$ où P_M est la puissance maximale et P_i est la puissance incidente.
- **R_s**: résistance série déterminée au voisinage du point correspondant à V_{CO} ($R_s = \Delta V / \Delta I$);
- **R_{sh}**: résistance shunt déterminée au voisinage du point correspondant à I_{CC} ($R_{sh} = \Delta V / \Delta I$).

B. Réponse spectrale

1) Réponse spectrale externe

C'est la valeur de la densité du courant de court-circuit J_{sc} (photocourant) de la cellule par unité de flux monochromatique incident.

$$RS(\lambda) = \frac{J_{sc}}{q \times F(\lambda)} \tag{2}$$

2) Réponse spectrale interne

La réponse spectrale interne est la valeur de la densité du courant de court-circuit de la cellule, par unité de flux monochromatique traversant la surface de la cellule.

$$RS(\lambda) = \frac{J_{sc}}{q \times F(\lambda) \times (1 - R(\lambda))} \tag{3}$$

Où $R(\lambda)$ est le coefficient de réflexion du matériau absorbeur (couche active).

La Fig.7 donne, à titre de comparaison, les réponses spectrales d'une cellule à base du silicium cristallin et d'une cellule CIS (Cuivre-Indium-Sélénium) dans les domaines VIS et IR où on constate que la réponse maximale se situe vers 900 nm pour la cellule à base silicium cristallin et 940 nm pour la cellule à base de CIS.

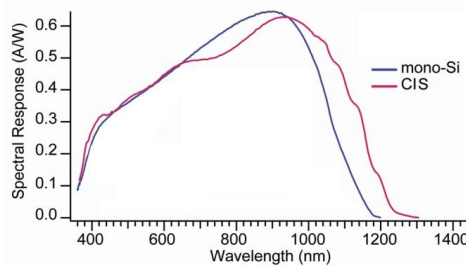


Figure 7. Réponse spectrale pour des cellules CIS et Silicium [11]

VII. ASSOCIATION DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

Une cellule photovoltaïque est un dispositif d'une surface de l'ordre de 100 cm^2 qui génère une tension de 0.5 à 1 V et un courant de court circuit de quelques dizaines de milliampères. Ces niveaux de tension et de courant n'ont pas un grand intérêt dans les applications en pratique. C'est la raison pour laquelle on associe les cellules photovoltaïques pour générer des tensions et des courants requis dans les différentes applications.

A. Module photovoltaïque

Un module est l'association de cellules en série et en parallèle (28 à 36 cellules) pour générer une tension de l'ordre de 12V. Cette association obéit à des règles pour obtenir un assemblage performant qui fournit l'énergie électrique requise [12].

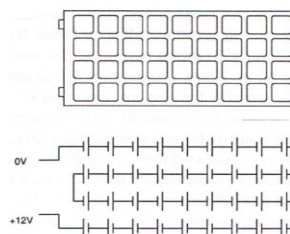


Figure 8. Association des cellules pour obtenir un module photovoltaïque

B. Panneau photovoltaïque

Un panneau photovoltaïque est l'association de plusieurs modules pour générer une puissance importante.

C. Générateur photovoltaïque

Un générateur ou champ photovoltaïque est l'association de plusieurs panneaux pour générer la puissance requise par une grande installation.

VIII. COÛT DE L'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE

Pour répondre à la question "quel est le prix de l'électricité photovoltaïque pour un foyer", il faut connaître le nombre de personnes habitant au sein du foyer considéré. Les estimations montrent qu'une personne correspond environ à 1 voire 1,50 m² de panneau solaire, et le m² qui produit environ 200 W crête revient à peu près à 1000 euros en moyenne [13]. Cependant, une installation alimentée en électricité photovoltaïque ne se limite pas à une simple acquisition des panneaux photovoltaïques. En fait, il faut avoir, en plus des panneaux, les batteries de stockage, un convertisseur DC/AC ou onduleur et un régulateur. Tout ses éléments ensemble font grimper le prix total d'une installation photovoltaïque à environ 7 à 10 fois le prix des panneaux.

IX. RÉSULTATS RÉCENTS

Avec une nouvelle structure de cellule photovoltaïque à quatre jonctions, on a obtenu:

- En mai 2013, l'équipe germano-française du Fraunhofer ISE, de Soitec, du CEA-Leti et du Centre Helmholtz de Berlin avait déjà annoncé une cellule photovoltaïque avec un rendement de 43,6 %.
- Le 23 Septembre 2013, de nouveaux travaux intensifs de recherche et des étapes d'optimisation par la même équipe ont permis d'atteindre une efficacité de 44,7%.

X. PERSPECTIVES

Le tableau ci-dessous illustre la feuille de route de l'industrie japonaise entre 2010 et 2030. On constate que l'objectif principal est de diminuer les prix tout en augmentant l'efficacité des différents types de cellules photovoltaïques, et ceci dans le but de démocratiser l'utilisation de l'énergie photovoltaïques pour préserver les ressources naturelles et faire face à la pollution qui menace la vie sur notre planète.

TABLE III. La feuille de route de l'industrie japonaise entre 2010 et 2030.

Thème	Cible 2010	Cible 2020	Cible 2030
Coût de production	100 yen/watt	75 yen/watt	<50 yen/watt
Durée de vie	-	+30 ans	-
Consommation de matière première	-	-	1 g/watt
Coût du convertisseur	-	-	15 000 yen/kW
Coût de la batterie	-	10 yen/Wh	-
Efficacité cellule cristalline	20 %	25 %	25 %
Efficacité cellule couche mince	15 %	18 %	20 %
Efficacité cellule CIS	19 %	25 %	25 %
Efficacité cellule III-V	40 %	45 %	50 %
Efficacité cellule "Dye Sensitized"	10 %	15 %	18 %

XI. CONCLUSION.

Les données relatives à la pollution, l'extinction des ressources énergétiques conventionnelles dans un futur proche et l'importance du gisement solaire, nous interpelle chaque jour, au lever et au coucher du soleil, d'exploiter cette énergie abondante, propre et durable.

RÉFÉRENCES

- [1] Alessandro Romeo "Growth and characterization of high efficiency CdTe / CdS solar cells" Doctor of natural science thesis, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2002.
- [2] Jenny Nelson, "The physics of solar cells", Imperial college press, 2005
- [3] S.M. Sze, "Physics of semiconductor devices", John Wiley and Sons, 1981
- [4] Luis Castaner and Santiago Silvester, "Modeling Photovoltaic Systems using PSpice, John Wiley & Sons, 2002
- [5] A. Vapaille et R. Castagné, "Dispositifs et circuits intégrés semi-conducteurs", Dund, 1987

- [6] Nichiporuk Oleksiy, "Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités", thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2005.
- [7] Naima Touafek, " Contribution à l'étude d'une cellule solaire en couches minces à base de $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ ", Thèse de doctorat, Département d'Electronique, Université des frères Mentouri de Constantine, 2015.
- [8] Samira Guitouni, " Elaboration et étude de structures à base de couches minces de ZnO et de chalcogénures (CIS, CZTS) pour des applications photovoltaïques", Thèse de doctorat, Département de Physique, Université des frères Mentouri de Constantine I, 2016.
- [9] Dang Minh Trung, "Elaboration de cellules solaires photovoltaïques à base de polymères conjugués, études des systèmes réticulables", Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1, 2009.
- [10] Bouzid Fayçal, " Effet de la température sur les propriétés électriques d'une photopile", Mémoire de magistère, Faculté des Sciences, Université Hadj Lakhdar de Batna, 2004.
- [11] <http://www.jade-technologie.com/panneaux-solaires-cis-copper-indium-selenium.htm>.
- [12] A. Laugier et J. A. Roger, "Les photopiles solaires", Technique et documentation, 1981.
- [13] <https://www.quelleenergie.fr/economies-energie/panneaux-solaires-photovoltaïques/prix-economies>