

# Chapitre 1

## GENERALITES SUR LES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

### 1.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons introduire les cellules solaires photovoltaïques, leur principe de fonctionnement, leur schéma électrique équivalent ainsi que leurs différentes filières technologiques. Nous aborderons ensuite les couches antireflets (CAR) et nous terminerons par les propriétés fondamentales de l'oxyde d'hafnium utilisé comme CAR et les voies de sa synthèse.

### 1.2. Les cellules solaires

Les cellules solaires sont fabriquées à partir des mêmes types de matériaux semiconducteurs, comme le silicium, que ceux utilisés dans le secteur de la microélectronique. Pour les cellules solaires, une fine plaquette semiconductrice est spécialement traitée pour former un champ électrique, positif sur une face et négatif sur l'autre. Lorsqu'une énergie lumineuse frappe la cellule solaire, les électrons se détachent des atomes du matériau semiconducteur. Si des conducteurs électriques sont fixés sur les faces positive et négative, pour former un circuit électrique, les électrons peuvent être capturés sous forme de courant électrique, c'est-à-dire de l'électricité. Cette électricité peut en suite être utilisée pour alimenter une charge, telle qu'une lampe ou un outil.

Plusieurs cellules solaires reliées électriquement entre elles et montées sur une structure ou un cadre de support constituent ce que l'on appelle un module photovoltaïque. Ces modules sont conçus pour fournir de l'électricité à une certaine tension, telle qu'un système 12 volts classique. Le courant produit dépend directement de la quantité de lumière qui frappe le module.

Plusieurs modules peuvent être installés ensemble pour former un champ. En général, plus la surface d'un module ou d'un champ est grande, plus la production d'électricité sera importante. Les modules et champs photovoltaïques produisent de l'électricité en courant continu (cc). Ils peuvent être reliés aussi bien en série qu'en parallèle de façon à produire toute combinaison de tension et de courant requise [1].

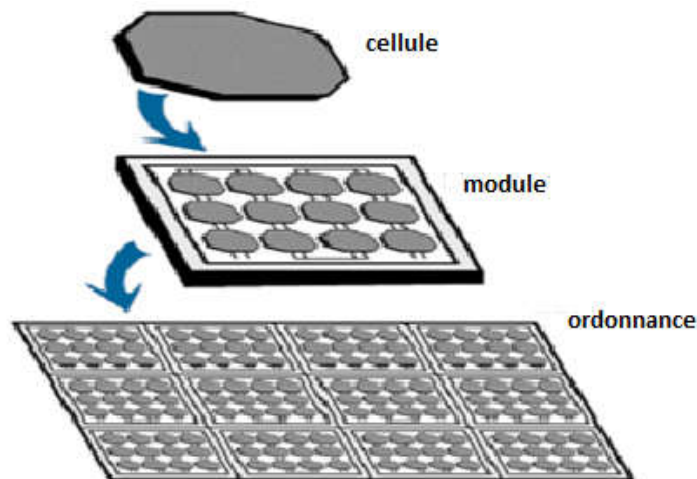


Figure 1.1. Cellule photovoltaïque et agencement des cellules photovoltaïques

### 1.3. Classification des cellules solaires

Les cellules solaires peuvent être classées selon différents critères, le plus courant étant l'épaisseur du matériau. On distingue les cellules à couche épaisse des cellules à couche mince.

Autre critère le matériau, comme matériaux semiconducteurs, on peut utiliser des composés de tellure de cadmium (CdTe), d'arséniure de gallium (GaAs) ou de cuivre-indium-sélénium, mais le plus courant à l'échelle mondiale est le silicium. La structure du cristal, cristalline (mono-/poly-cristalline) ou amorphe.

Outre les matériaux semiconducteurs, il existe également des nouvelles approches du matériau, telles que les cellules solaires organiques et les cellules solaires à colorant [1].

### 1.3.1. Les types de cellules solaires selon le type de cristal

Pour produire une cellule en silicium monocristallin, il faut un matériau semiconducteur absolument pur. Les barreaux monocristallins sont extraits du silicium fondu, puis sciés en fines plaques. Ce processus de production garantit un niveau d'efficacité relativement élevé [1].

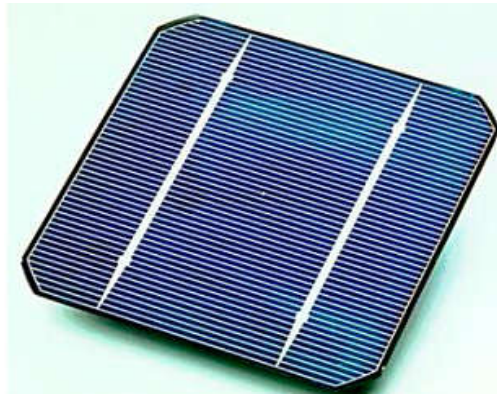


Figure 1.2. Cellule solaire fabriquée à partir d'une plaquette de silicium monocristallin

La production de cellules polycristallines est plus rentable. Au cours de ce processus, du silicium liquide est versé dans des blocs qui sont ensuite sciés en plaques. Durant la solidification du matériau, des structures en cristal de différentes tailles se forment, en bordure desquelles des défauts apparaissent. La cellule solaire est rendue moins efficace par ces défauts dans le cristal [1].

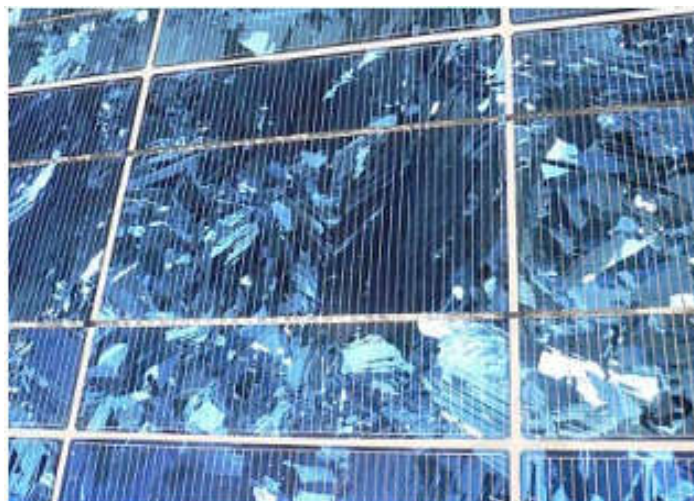


Figure 1.3. Cellule solaire fabriquée à partir d'une plaquette de silicium polycristallin

Si une couche de silicium est déposée sur du verre ou un autre matériau de substrat, on obtient ce que l'on appelle une cellule amorphe ou à couche mince. L'épaisseur de la couche est inférieure à 1  $\mu\text{m}$ , donc les coûts de production sont moins élevés en raison du faible coût des matériaux. Toutefois, les cellules amorphes sont moins efficaces que les deux autres types de cellules. C'est la raison pour laquelle elles ont principalement été utilisées dans les équipements de faible puissance (montres, calculatrices de poche) ou en éléments de façade. Mais, désormais, elles sont également utilisées dans les fermes solaires de classe mégawatt [2].

### 1.3.2. Cellules solaires organiques

La cellule solaire organique est une autre alternative aux matériaux plus conventionnels utilisés pour fabriquer des panneaux photovoltaïques. Bien qu'il s'agisse d'une technologie très nouvelle, elle s'avère prometteuse du fait qu'elle constitue une solution à très bas coût [1].

## 1.4. Caractérisation des cellules solaires

### 1.4.1. Structure et principe de fonctionnement d'une cellule solaire

#### 1.4.1.1. Principe de fonctionnement

Une cellule solaire est un composant électronique qui convertit la lumière du soleil en électricité. La structure de base est présentée sur la Figure 1.4.

Le principe de la conversion photovoltaïque peut être décrit par les mécanismes suivants [3]:

- absorption des photons incidents et création de paires électron-trou si l'énergie du photon incident est supérieure au gap du matériau.
- Diffusion des porteurs de charges minoritaires jusqu'à la zone de charge d'espace. Transfert des charges électriques dans la zone où elles vont être majoritaires grâce au champ électrique présent au niveau de la zone de charge d'espace de la jonction p-n et collecte. Au cours de la diffusion des charges vers la zone de charge d'espace les charges électriques peuvent se recombiner et être perdues.
- dissipation de puissance dans la charge et dans les résistances parasites.

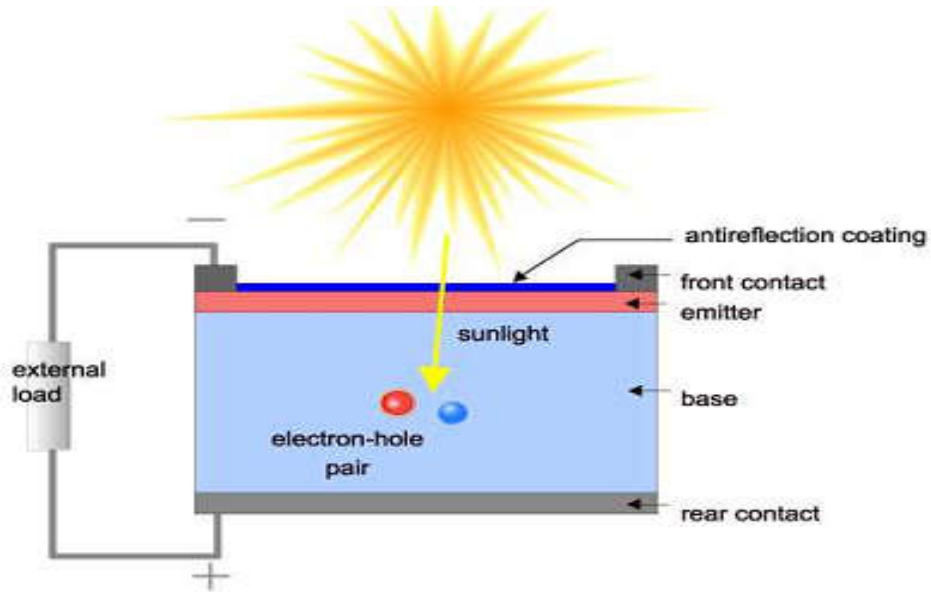


Figure 1.4. Structure de base d'une cellule solaire

1.4.1.2. Caractéristique  $I(V)$

La caractéristique courant-tension  $I(V)$  sous obscurité est celle d'une diode (récepteur). Sous éclairement, cette caractéristique se décale vers les courants négatifs (Figure 1.5), la cellule solaire peut alors jouer le rôle de générateur de puissance [3].

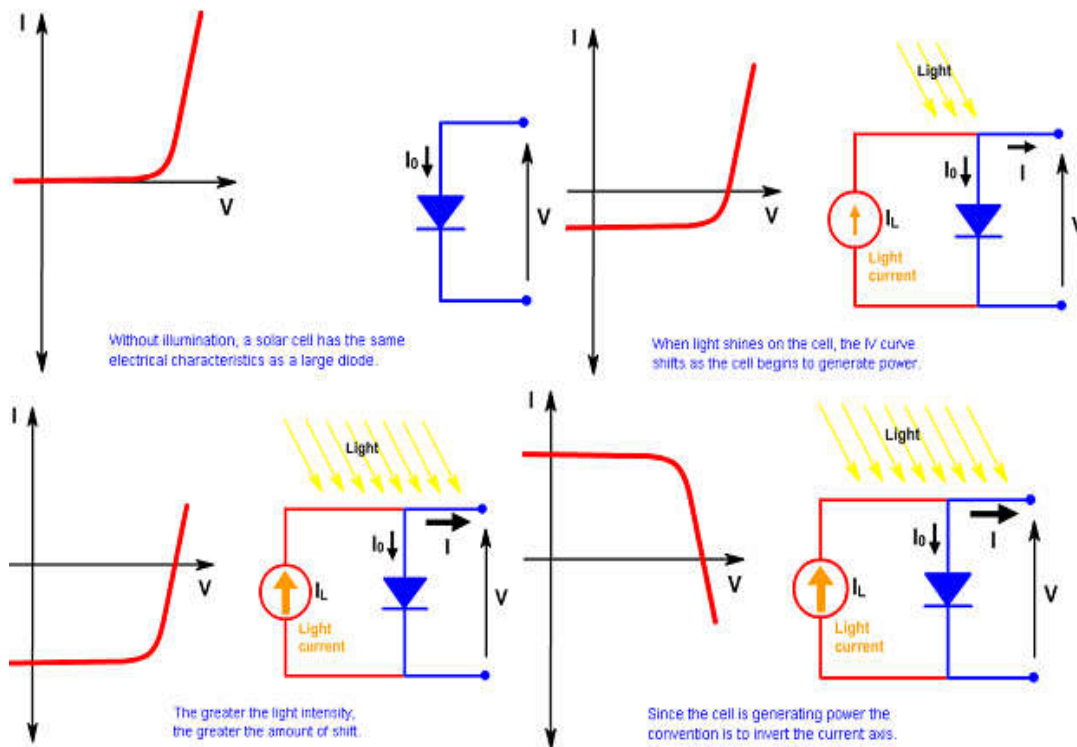


Figure 1.5. Caractéristique d'une cellule solaire

Le schéma électrique équivalent de la cellule solaire est présenté ci-après. Il tient compte des résistances série  $R_s$  et parallèle  $R_p$  ( $R_{shunt}$  en anglais). Le courant peut s'exprimer sous la forme :

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \frac{q(V+IR_s)}{nkT} \right] \frac{V+IR_s}{R_p} \quad (1.1)$$

$I_{ph}$ : courant photo-généré ( $I_L$  sur les Figures 1.5 et Figures 1.6)

$I_s$ : courant de saturation de la diode

$n$  : facteur d'idéalité de la diode

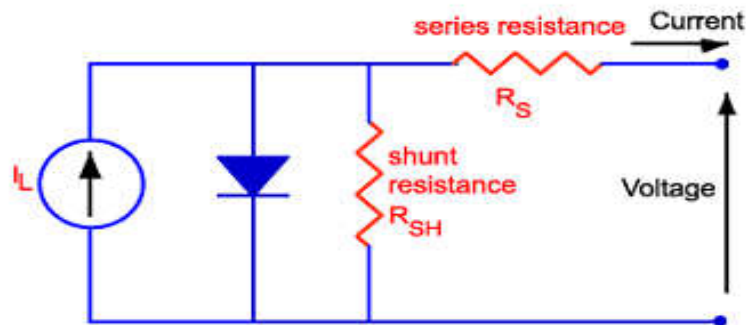


Figure 1.6. Circuit électrique équivalent

### 1.5. Les couches antireflets

Pour minimiser la réflexion de la lumière, une couche antireflet (CAR) est utilisée. Le principe d'action des couches antireflet est basé sur l'interférence des faisceaux lumineux dans les couches diélectriques minces (Figure 1.7). Si l'épaisseur de la couche diélectrique est égale à :

$$d_{CAR} = \frac{(2N+1)\lambda}{4n_{CAR}} \quad , \quad N = 1,2,3, \dots \quad (1.2)$$

$n_{CAR}$  étant l'indice de réfraction de la couche antireflet.

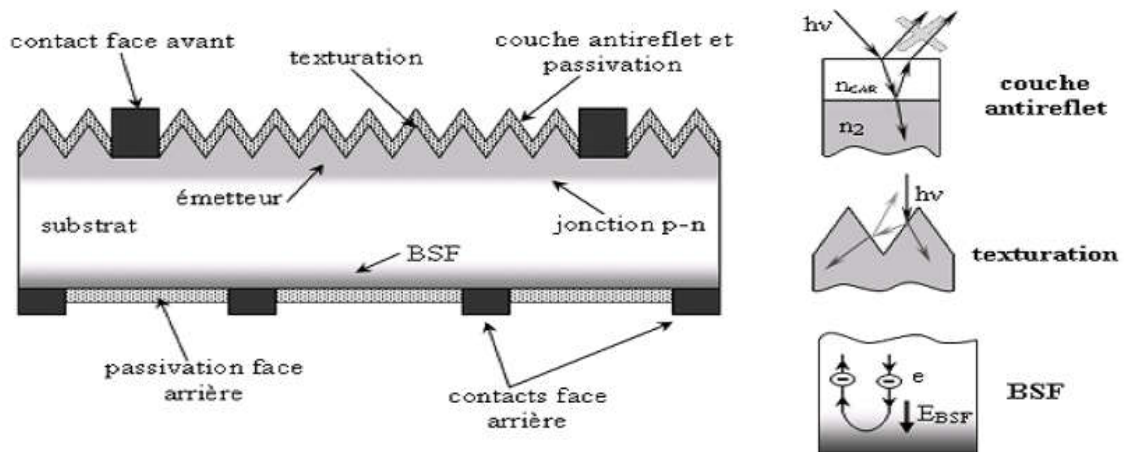


Figure 1.7. Présentation d'une couche antireflet déposée sur la cellule photovoltaïque

L'utilisation d'une structuration de la surface avant (texturation), alliée à une couche antireflet (CAR), permet de réduire drastiquement la réflexion du rayonnement incident. Le procédé de texturation consiste à créer un relief micrométrique à la surface du wafer de silicium [4]. La forme généralement pyramidale du relief multiplie les réflexions et donc les chances pour la lumière de pénétrer dans le matériau. En effet, le rayonnement incident est constitué de longueurs d'onde inférieures aux dimensions des structures réalisées (quelques  $\mu\text{m}$ ). Dans le cas d'une double réflexion (Figure 1.8), le coefficient de réflexion total devient  $R^2$ , ce qui entraîne une baisse de la réflexion totale de cette surface. Les techniques industrielles de texturation se font le plus souvent par voie chimique alcaline (KOH, NaOH). Cependant, les voies acide et sèche font l'objet d'un intérêt croissant en particulier pour les matériaux multi-cristallins [5].

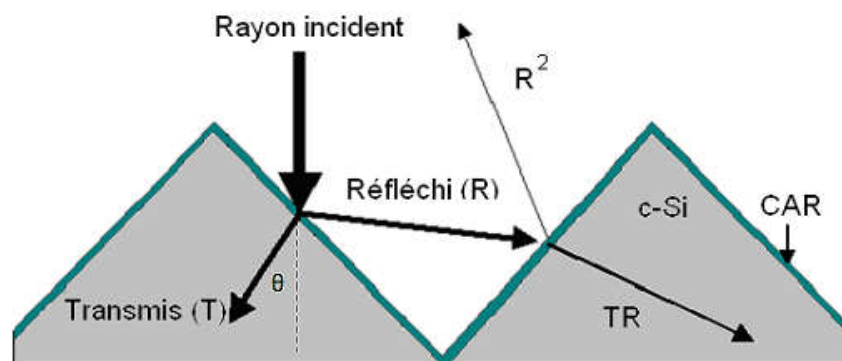


Figure 1.8. Schéma de principe des réflexions lumineuses sur une surface texturée.  $R$  est le coefficient de réflexion,  $T$  le coefficient de transmission et  $T+R=1$  (l'absorption est négligée).

Une couche antireflet déposée sur la face avant des cellules aide à améliorer le confinement optique. La couche antireflet permet d'adapter l'indice optique entre le milieu extérieur et le silicium, et ainsi minimiser les réflexions. Pour cela, il est nécessaire que cette couche possède un indice de réfraction ( $n_{CAR}$ ) ainsi qu'une épaisseur  $d_{CAR}$  adaptés au milieu extérieur d'indice  $n_{ext}$ . Les relations (2) et (3) permettent de déterminer les valeurs de  $d_{CAR}$  et  $n_{CAR}$  en fonction du milieu extérieur et du silicium ( $n_{Si}$ ). Le minimum de réflexion peut être atteint pour des valeurs périodiques de  $d_{CAR}$  dépendant de l'entier  $N=1$ . Il est en général préférable de prendre afin de limiter l'épaisseur de la couche antireflet [5].

$$n_{CAR} = \sqrt{n_{ext}n_{Si}} \quad (1.3)$$

On obtiendra l'annulation des faisceaux réfléchis à l'interface air/CAR et CAR/semi-conducteur. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, une double couche antireflet est utilisée (avec deux diélectriques différents). Différentes couche antireflet (CAR) sont utilisées en photovoltaïque :  $TiO_2$ ,  $SiO_2$ ,  $HfO_2$ ,  $ZnS$ ,  $MgF_2$ ,  $SiNx$ , etc [6].

Le fonctionnement des couches antireflets, repose sur l'adaptation de l'indice de réfraction de la couche de façon à produire des interférences destructives [7,8] à une certaine longueur d'onde en tenant compte de l'épaisseur de la couche. Le matériau utilisé comme couche antireflet doit être non absorbant dans la gamme du spectre solaire.

### 1.5.1. Principe d'une couche antireflet

On considère une couche fine antireflet d'épaisseur  $d$  et d'indice de réfraction  $n_2$ . Cette dernière est située entre l'air d'indice de réfraction  $n_1$  et un substrat d'indice  $n_3 > n_2$  [9].



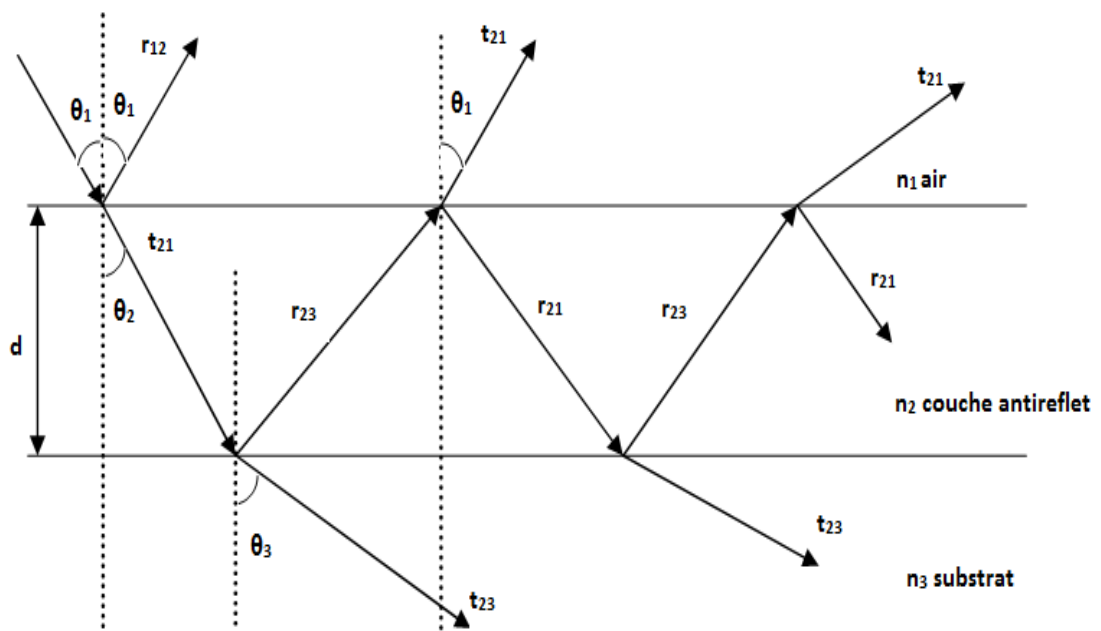


Figure 1.9. Rayonnements incidents, réfléchis et transmis entre trois milieux différents (air, couche antireflet, substrat).

### 1.6. Généralité sur L'oxyde d'hafnium $\text{HfO}_2$

Ces dernières années, les composés du hafnium sont considérés plus probablement pour leur application comme barrières diélectriques, passe-bande, revêtements anti-réflexion et filtres multicouches [10]. L'oxyde d'hafnium ( $\text{HfO}_2$ ) est l'un des matériaux réfractaires importants en raison de ses propriétés intrigantes telles que sa haute constante diélectrique ( $\sim 25$ ), son point de fusion élevé (3085 K), son grand indice de réfraction ( $\sim 2.9$ ), sa stabilité chimique et sa non-toxicité.  $\text{HfO}_2$  pourrait être un substitut approprié pour l'oxyde de silicium en raison de sa grande constante diélectrique d'environ 25, par rapport à l'oxyde de silicium avec une constante diélectrique de 3,9 [11]. En raison de son indice de réfraction élevé, ce matériau est très prometteur dans la lithographie par immersion pour l'amélioration de la résolution [12]. Les avantages du  $\text{HfO}_2$  s'étendent également aux applications médicales telles que la radiothérapie en raison de ses propriétés d'oxydation potentielles [13].

Jusqu'à ce jour, l'oxyde d'hafnium a été synthétisé par diverses procédures en utilisant les méthodes solvo-thermales et hydrothermales [14,15]. Toute fois, une méthode

très répandue pour la synthèse de  $\text{HfO}_2$  avec reproductibilité élevée n'a pas encore été rapportée.

### 1.7. Synthèse du $\text{HfO}_2$

Le  $\text{HfO}_2$  peut être synthétisés par le procédé de précipitation en utilisant le tétrachlorure de hafnium ( $\text{HfCl}_4$ ) et d'hydroxyde de sodium ( $\text{NaOH}$ ) à partir des précurseurs. En bref, une solution aqueuse 0,4 M de  $\text{NaOH}$  est ajoutée lentement en ajoutant goutte à goutte dans une solution aqueuse 0,1 M de tétrachlorure de hafnium ( $\text{HfCl}_4$ ) et on laisse sous agitation vigoureuse en utilisant du Téflon magnétique pendant 3 heures, ce qui donne un précipité de couleur blanche de l'hydroxyde d'hafnium. Le  $\text{Hf}(\text{OH})_4$  précipité est alors lavé avec de l'eau distillée et centrifugée à 3000 rpm pendant 10 minutes afin d'éliminer le résidu. Le mode opératoire est répété plusieurs fois jusqu'à ce que le précipité est exempt de traces d'impuretés. Le obtenu  $\text{Hf}(\text{OH})_4$  précipité est séché dans un four à air chaud à  $60^\circ\text{C}$  pendant 1 h et puis encore calciné à  $500^\circ\text{C}$  pendant 2 heures, ce qui entraîne la formation du  $\text{HfO}_2$  [17].

### 1.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté sommairement les cellules photovoltaïques, leur principe de fonctionnement, leur schéma électrique équivalent et les différentes filières technologiques de ces cellules solaires. Nous avons traité ensuite des couches antireflets (CAR) utilisée pour réduire les pertes par réflexion à la surface de la cellule. Un intérêt particulier a été accordé à l'oxyde d'hafnium utilisé seul ou avec en combinaison avec d'autres matériaux comme CAR. Nous avons rappelé ces propriétés fondamentales ainsi que certaines voies de sa synthèse.

## REFERENCES

- [1] I. Zetis. Renewable energies transfer system (RETS) Article sur l'énergie solaire - Photovoltaïque
- [2] J. Holding AG, Allemagne, Article sur l'énergie solaire - Photovoltaïque
- [3] Article sur la Caractérisation de cellules solaires : <http://pveducation.org/pvcdrom>
- [4] J. Haynos, J. Allison, R. Arndt, A. Meulenberg. The Comsat non-reflective silicon solar cell: a second generation improved cell. International Conference on Photovoltaic Power Generation, Hamburg, pages 487-490, 1974
- [5] D. Thibaut. Développement de cellules photovoltaïques à hétérojonctions silicium et contacts en face arrière . 30/11/2009
- [6] P. Fath, C. Borst et al. « Progress Ina novel high-throughput mechanical texturisation technology for highly efficient multicrystalline silicon solar cells. Solar En.Mat. &Sol.Cells ». Vol. 48, pp. 229-236.1997
- [7] M. Madani, « réalisation des couches antireflets dans les cellules solaires à couches minces ». mémoire de Magisters, Université Abou-Baker Belkaid de Tlemcen, 2006.
- [8] L. Remmache, « Silicium poreux passivé par des nitrués et des oxydes de silicium. Application aux revêtements anti réfléchissants ». mémoire de Doctorat, Université Mentouri de Constantine, 2011.
- [9] A. Mouhoub, « procédés technologiques alternatifs de réalisation des photopiles solaires au silicium cristallin ». rev. Energ. Ren. Vol. 4, 2001 , 11-22.
- [10] R. Ramprasad, N. Shi. Dielectric properties of nanoscale HfO<sub>2</sub> slabs. Phys Rev B 2005;72:052107-11.
- [11] S. Chen, T. Chang, P. Yang, J. Lu, H. Huang, et al. Low-temperature ozone passivation for improving the quality of sputtered HfO<sub>x</sub> thin-film.Mater Lett 2009;63:1914,6.
- [12] P. Zimmerman, C. Creek, J. Byers , C. Simons . Patent US0213346 A1, 2009.
- [13] R. Gil, D. Huhn, L .Mercato, D. Sasse, W. Parak. Nanopharmacy: inorganic nanoscale devices as vectors and active compounds. Pharmacol Res 2010;62:115–25.

- [14] S. Elizario, L. Cavalcante, J. Sczancoski, P. Pizani, A. Varela, J. Espinosa, et al. Morphology and photoluminescence of HfO<sub>2</sub> obtained by microwavehydrothermal. *Nanoscale Res Lett* 2009;4:1371–9.
- [15] P. Meskin, F. Sharikovb, V. Ivanov, B. Churagulo, Y. Tretyakov. Rapid formation of nanocrystalline HfO<sub>2</sub> powders from amorphous hafnium hydroxide under ultrasonically assisted hydrothermal treatment. *Mater Chem Phys* 2007;104:439–43.
- [16] W. Buhro, V. Colvin. Semiconductor nanocrystals: shape matters. *Nat Mater* 2003;2:138–9
- [17] A. Ramadoss, K. Krishnamoorthy, S. Kim, Article-Facile synthesis of hafnium oxide nanoparticles via precipitation method, *Materials Letters* 75 (2012) 215–217