



**République Algérienne démocratique et populaire**  
**Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique**

**Université Aboubekr Belkaid de Tlemcen**

**Faculté de Technologie**

**Département Génie Electrique et Electronique**

Mémoire pour l'obtention du diplôme Master II en Electronique

Option : « **Instrumentation** »

**Thème**

**DIMENSIONNEMENT D'UNE INSTALLATION PV HYBRIDE**

« APPLICATION A UN SYSTEME RACCORDE AU RESEAU »

Présenté par :

M<sup>r</sup> RAHMOUN Abdessamad

M<sup>r</sup> HABIBES Zoubir

**Présidente :** M<sup>me</sup> BOUAZZA née GUEN.A Professeur

**Examineur :** M<sup>r</sup> BENMOUSSA Nasreddine Maitre de conférences A

**Encadreur :** M<sup>r</sup> GHAFfour Kheireddine Professeur

**Année Universitaire 2016-2017**

# Remerciement

*Au nom de Dieu le tout puissant et miséricordieux*

*Je remercie chaleureusement **Mr Ghaffour** Professeur à l'université Abou Beckr Belkaid de Tlemcen,, d'avoir accepté de nous encadrer sur un sujet aussi passionnant. Nous gardons en mémoire sa patience, sa confiance et ses conseils bienveillants. Soyez rassuré de notre profonde gratitude et de notre respectueuse considération, vos qualités scientifiques et humaines resteront à jamais pour nous l'exemple.*

*Je tiens à exprimer mes vifs remerciements pour **Mme Bouazza** Professeur à l'université Abou Beckr Belkaid de Tlemcen. Merci de nous avoir fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire. Veuillez trouver ici le témoignage de notre respect le plus profond.*

*Je remercie également **Mr Benmoussa** Maîtres de conférences à l'université de Tlemcen, de l'intérêt qu'il a bien voulu porter à ce travail en acceptant de faire partie du jury. Soyez assuré de notre profonde gratitude.*

*J'adresse mes sincères remerciements à **collègues et camarades de classe** qui ont été de vrais collaborateurs, merci pour leur disponibilité, leur dévouement, leur bonne humeur et leur conseil de tous les jours.*

*J'adresse mes sincères remerciements à **tous les professeurs** de la faculté des Sciences de technologie, qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences et leur générosité nous ont soutenu dans la poursuite de nos études.*

*Enfin, je présente mes remerciements, mon respect à tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à la réussite de ce travail et qui n'ont pas pu être cités ici.*

## *Dédicace*

*A la mémoire de ma mère ; que dieu te bénisse maman, repose en paix*

*Merci et mille fois merci, mon cher PAPA, pour ton amour inconditionnel qui m'accompagnent depuis toujours, pour le soutien dans mes choix, les tendres encouragements et les grands sacrifices que tu m'as apporté durant toutes ces longues et laborieuses années.*

*Je prie le bon Dieu de veiller sur toi, en espérant que tu sois toujours fier de moi.*

*Je dédie ce modeste travail également*

*A ma femme chérie et mes deux princesses, mes rayons de soleil RAZANE et LYLIA, que dieux vous bénisse toutes. A ma tendre sœur et toute ma belle famille, merci pour tous ...*

*A tous mes amis et camarades de promotion pour cette année passée ensemble, dans les meilleurs moments comme dans les pires. Ils vont trouver ici le témoignage d'une fidélité et d'une profonde amitié.*

*Abdessamad RAHMOUN*

# *Dédicace*

*A mes chers parents, pour l'amour qu'ils m'ont porté ...*

*A ma femme, mes enfants Abdelhakim, Soundous, Ikhllass & Doha ainsi qu'a toute les  
familles HABIBES et HOUALF.*

*Je dédie ce modeste travail également*

*Pour tous mes amis qui ont toujours été la pour moi,*

*c a vous tous que je dédie ce travail*

*Zoubir HABIBES*

<b>a-Si</b>	Silicium amorphe
<b>CdTe</b>	Tellurure de Cadmium
<b>CIGS</b>	Cuivre Indium Gallium Sélénium
<b>CIGS</b>	Crystalline Silicon (silicium cristallin massif, par opposition à silicium amorphe).
<b>EVA</b>	Ethylène-Vinyl Acétate
<b>KWc</b>	kilowatt-crête, unité pour caractériser la puissance délivrée par un module PV sous un ensoleillement standard de 1 kW/m <sup>2</sup> , (kilowatt-peak ou kWp en anglais).
<b>mc-Si</b>	Multicrystalline Silicon (silicium multicristallin)
<b>MG-Si</b>	Metallurgical-Grade Silicon (silicium de grade métallurgique) obtenu à partir de la silice par des procédés métallurgiques. pureté de 98 à 99%, soit un taux d'impuretés d'environ 15000 ppm.
<b>Poly-Si</b>	PolySilicon (polysilicium ou silicium polycristallin) obtenu à partir de MG-Si par des procédés chimiques (typiquement Siemens). Utilisé pour la cristallisation des lingots. Pureté de 99,9999%, soit un taux d'impuretés d'environ 1 ppm.
<b>PV</b>	Photovoltaïque
<b>sc-Si</b>	Single Crystalline Silicon (silicium monocristallin)
<b>SoG-Si</b>	Solar-Grade Silicon (silicium de grade solaire), nom du Poly-Si spécifique à la filière solaire (par opposition à la filière électronique). obtenu à partir de MG-Si par des procédés chimiques ou métallurgiques, ou directement à partir de silice très propre, ou d'UMG-Si. Utilisé pour la cristallisation des lingots. Pureté de 99,9999%, soit un taux d'impuretés d'environ 1 ppm.
<b>n :</b>	Nombre d'électrons dans la BC
<b>N(E)</b>	Densité d'Etat effective dans la bande de conduction
<b>F(E)</b>	Probabilité pour qu'un état d'énergie E soit occupé
<b><i>E<sub>f</sub></i></b>	Le niveau de fermi
<b><i>E<sub>f<sub>n</sub></sub></i></b>	Le niveau de fermi de la région N
<b><i>E<sub>v</sub></i></b>	La limite supérieure de la bande de valence
<b><i>E<sub>c</sub></i></b>	La limite inférieure de la bande de conduction
<b>h</b>	constante de plank
<b>j<sub>g</sub></b>	le courant généré par la lumière
<b>J<sub>i</sub></b>	le courant inverse qui passe au travers de la jonction
<b>R<sub>u</sub></b>	la résistance de charge
<b>j<sub>u</sub></b>	le courant passant dans le circuit d'utilisation
<b>V</b>	la tension de polarisation due au passage du courant j <sub>g</sub>
<b>V<sub>u</sub></b>	la tension aux bornes du circuit d'utilisation
<b>R<sub>s</sub></b>	la résistance interne de la cellule qui peut être considérée comme étant en série
<b>J<sub>cc</sub></b>	Le courant de court-circuit
<b>V<sub>co</sub></b>	la tension de circuit ouvert V <sub>co</sub>
<b>P</b>	la puissance électrique fournie par la cellule, P=V <sub>u</sub> j <sub>u</sub>
<b>P<sub>max</sub></b>	la puissance fournie par la cellule dans les conditions optimales

<b>cm<sup>2</sup></b>	Unité de mesure
<b>um</b>	Micro metre
<b>FF</b>	Facteur de forme
<b>η</b>	Rendement électrique
<b>S</b>	Surface de la cellule
<b>E</b>	irradiation incidente (AM1.5) 1000Wh/m <sup>2</sup>
<b>b</b>	Bore
<b>Ph</b>	Phosphore
<b>p-n</b>	Jonction PN de la cellule
<b>q</b>	Charge élémentaire d'un électron
<b>CZ</b>	le procédé Czochralski
<b>HF</b>	d'acide fluorhydrique
<b>CH<sub>3</sub>COOH</b>	Acide acétique
<b>HNO<sub>3</sub></b>	Acide nitrique
<b>POCl<sub>3</sub></b>	Phosphoryle
<b>NaOH</b>	Alcalin de soude
<b>KOH</b>	Potasse
<b>IPA</b>	Alcool isopropylique additifs organiques
<b>CF<sub>4</sub></b>	Gaz tétrafluorométhane
<b>O<sub>2</sub></b>	Oxygène
<b>PECVD</b>	Dépôt chimique en phase gazeuse via un plasma (PECVD)
<b>SiH<sub>4</sub></b>	Silane
<b>NH<sub>3</sub></b>	Ammoniac
<b>CIS</b>	cuiivre-indium-sélénium
<b>BSF</b>	
<b>AM1.5</b>	Condition de test rayon incident de 1000w/m <sup>2</sup> avec 45 degrés d'inclinaison, traversant 1.5 la largeur de l'atmosphère terrestre
<b>BC</b>	bande de conduction
<b>BV</b>	bande de valence
<b>K</b>	Coefficient correcteur de l'algorithme MPPT auto-adaptatif
<b>Ev</b>	Electron Volt unité de calcul de l'Energie
<b>E</b>	Energie
<b>Pcrête</b>	puissance crête
<b>Ej</b>	besoins journaliers en électricité (en Wh/j)
<b>Hmin</b>	l'irradiation journalière Minimum (en Wh/j/m <sup>2</sup> )
<b>Hbat</b>	rendement énergétique de la batterie
<b>Hond</b>	rendement énergétique de l'onduleur
<b>helec</b>	rendement énergétique des autres composants électroniques : 90%
<b>Cbatt</b>	capacité de batterie
<b>SH</b>	un système dit hybride
<b>SHSER</b>	Un système hybride a sources d'énergie renouvelables (SHSER)
<b>CC</b>	courant Continu
<b>CA</b>	courant alternatif
<b>PC1D</b>	logiciel de simulation

## LISTES DES FIGURES

**Figure. I.2 :** Le Pyranomètre : Cet instrument est destiné à mesurer le rayonnement solaire

**Figure. I.3 :** Le Pyrhéliomètre : Il est destiné à la mesure du rayonnement solaire direct

**Figure I.4 :** La structure de la cellule photovoltaïque

**Figure I.5 :** Le diagramme énergétique d'un semi-conducteur intrinsèque

**Figure I.6 :** la structure électronique des atomes de phosphore, de silicium et de l'aluminium

**Figure. I.7 :** Description d'une photopile ou cellule photovoltaïque

**Figure I.8 :** schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

**Figure I.9 :** l'influence du dopage sur Les caractéristiques : tension, courant et puissance. Dopage 1 :  $2.87 \text{ e}+20 \text{ cm}^{-3}$

**Figure I.10:** La réponse du rendement quantique ; Dopage 1 :  $2.87 \text{ e}+20 \text{ cm}^{-3}$

**Figure I.11 :** l'influence du dopage sur Les caractéristiques : tension, courant et puissance. Dopage 2 :  $25 \text{ e}+20 \text{ cm}^{-3}$

**Figure I.12 :** La réponse du rendement quantique ; Dopage 2 :  $25 \text{ e}+20 \text{ cm}^{-3}$

**Figure I.13 :** l'influence du dopage sur Les caractéristiques : tension, courant et puissance. Dopage 3 :  $5 \text{ e}+21 \text{ cm}^{-3}$

**Figure I.14 :** La réponse du rendement quantique ; Dopage 3 :  $5 \text{ e}+21 \text{ cm}^{-3}$

**Figure I.15 :** L'influence de l'épaisseur de l'émetteur sur les caractéristiques : tension, courant et puissance, Épaisseur :  $0.1049 \text{ um}$

**Figure I.16** : La réponse du rendement quantique ; Epaisseur1 : 0.1049 um

**Figure I.17** : l'influence du l'épaisseur de l'émetteur sur les caractéristiques : tension, courant et puissance, Epaisseur2 : 0.200 um

**Figure I.18** : La réponse du rendement quantique ; Epaisseur2 : 0.200 um

**Figure I.19** : L'influence du l'épaisseur de l'émetteur sur les caractéristiques : tension, courant et puissance ; Epaisseur 3: 0.250 um

**Figure I.20** : La réponse du rendement quantique ; Epaisseur 3: 0.250 um

**Figure I.21** ; Evolution du rendement en fonction de profondeur de texturation : Avec l'angle  $\Theta = 54.74^\circ$

**Figure I.22** : Evolution du rendement en fonction de l'Angle de texturation : Profondeur 3um

**Figure I.23** : Evolution du rendement en fonction du dopage :

**Figure I.24** : Evolution du rendement en fonction de l'épaisseur :

**Figure II.1** : Processus de fabrication des systèmes photovoltaïques

source : EPSIC - D.Schneider

**Figure. II.2** : Procédé Siemens

**Figure II.3** : Lingots de silicium monocristallin

**Figure II.4** : Plaque de silicium

**Figure II.5**: Cellule au silicium cristallin (Source : Découverte n°344-345 janvier-février 2007)

**Figure II.6** : assemblage des modules

**Figure II.7** : groupement de plusieurs modules pour réaliser un système photovoltaïque

**Figure II.8** : Étapes dans la fabrication d'un système photovoltaïque ; Source : Hespul



**Figure II.9 :** Cellule en silicium monocristallin

**Figure II.10 :** Cellule en silicium poly cristallin

**Figure II.11 :** Cellule photovoltaïque amorphe

**Figure II.12 :** Cellule photovoltaïque de type cuivre - indium - sélénium (CIS) crédit : Solar World

**Figure II.13 :** Cellule Tandem

**Figure II.14 :** cellule photovoltaïque multi jonction

**Figure II.15:**structure d une cellule multjonction

**Figure II.16 :** Schéma de la cellule inter digitée (gauche), Image de la face arrière (structure inter digitée) et de la face avant de la cellule réalisée (droite).

**Figure III.1 :** Le profil de consommation pour chaque mois

**Figure III.2 :** Le profil de consommation de chaque appareil étalé sur une durée d'une année

**Figure III.3 :** Résultat prévis, rendement avec consommation

**Figure III.5 :** Energie produite par le système photovoltaïque par apport la consommation

**Figure IV.1 :** Système photovoltaïque raccordes au reseau

**Figure IV.2 :** Le système photovoltaïque est raccordé au réseau de distribution via un compteur double sens.

**Figure IV.3 :** La consommation annuelle

**Figure IV.4 :** Résultat prévis, rendement avec consommation

**Figure IV.5:** Utilisation de l'énergie

**Figure IV.6 :** Couverture de la consommation

**Figure IV.7 :** Cash-flow cumule (remboursement de la totalité de l'investissement)

# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I : FONCTIONNEMENT PHYSIQUE D'UNE CELLULE PV</b> .....	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Notions élémentaires sur le rayonnement solaire.....	3
I.2.1 rayonnement solaire.....	3
I.2.2 Les unités de mesure du rayonnement.....	4
I-3 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.....	5
I.3.1 La structure de la cellule photovoltaïque.....	5
I.3.2 Le fonctionnement .....	6
a-L 'absorption de la lumière dans le matériau .....	6
b- Le transfert de l'énergie lumineuse aux électrons .....	6
I.3.3 Les semi-conducteurs .....	7
I.4.1 Théorie.....	7
I.4.2 Le dopage et la jonction P.N.....	8
I.4.3 Jonction PN .....	11
I-5 Simulation et caractéristiques d'une cellule photovoltaïque.....	12
I.5.1 Influence du Dopage, épaisseur constante : 300 um.....	13
I.5.2 Influence de l'épaisseur de l'émetteur, Dopage Constant : $2.87 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ ; Type N.....	16
1.5.3 Evolution du rendement en fonction du profondeur de texturisation.....	18
➤ Surface texturée .....	18
➤ Intérêt de la texturisation .....	19
➤ Evolution du rendement en fonction de profondeur de texturation.....	19
➤ Evolution du rendement en fonction de l'Ongle du texturation : Profondeur 3um.....	19
1.5.4 Récapitulation des résultats.....	20
1- Evolution du rendement en fonction du dopage.....	20
2- Evolution du rendement en fonction de l'épaisseur.....	20
1.5.5 Conclusion.....	21
<b>CHAPITRE II : ETAT DE L'ART</b> .....	
I- Introduction.....	22
II- Techniques de fabrication.....	22
Etape 1 : raffinage du silicium.....	23

• La transformation du quartz en silicium de grade métallurgique ou MG-Si.....	23
• La purification du silicium métal en silicium de grade solaire ou SoG-Si.....	23
• Procédé Elkem.....	23
Etape 2 : cristallisation du silicium et la mise en forme des plaques.....	24
Etape 3 : fabrication des cellules.....	25
• Décapage .....	26
• Texturation.....	26
• Dopage.....	26
• Bords de plaque.....	26
• Anti-reflet.....	27
• Champ face arrière.....	27
• Champ face arrière.....	27
• Test et tri.....	27
Etape 4 : assemblage des modules.....	28
Etape 5 : groupement de plusieurs modules pour réaliser un système photovoltaïque.....	28
III- Les différents types de cellules photovoltaïques.....	29
Principe de fonctionnement.....	29
Les principaux types de cellules photovoltaïques.....	30
1- Cellule en silicium monocristallin.....	30
2- Cellule en silicium poly cristallin.....	30
3- Cellule silicium amorphe en couche mince.....	31
4- Cellule sans silicium en couche mince cis.....	32
5- Cellule Tandem.....	32
6- Cellule multijonction.....	33
7- Cellules multicouches.....	33
8- Cellule à contacte interdigités.....	34
➤ Perspectives.....	34
- La concentration.....	34
- Les cellules organiques.....	34
IV- Recherche et développement.....	35
V- Future.....	36
<b>CHAPITRE III : DIMENSIONNEMENT D'UN SYSTEME AUTONOME.....</b>	
III.1 Introduction.....	37

III.2 Dimensionnement.....	37
1- Positionnement des panneaux.....	37
2- Calcul du bilan de puissance.....	37
➤ 1ere Méthode : Calcul Manuel.....	38
• Détermination de la puissance crête.....	38
• Détermination de la capacité de stockage (batteries) .....	39
➤ 2eme Méthode: Dimensionnement en utilisant le logiciel PV Sol.....	39
- Profil de Consommation.....	40
- Emplacement des modules.....	42
- Choix de l'onduleur.....	42
- Batteries.....	43
- Résultats.....	43
<b>CHAPITRE VI : DIMENSIONNEMENT D'UNE INSTALLATION HYBRIDE</b>	
<b>RACCORDÉE AU RÉSEAU.....</b>	
IV.1 Définition.....	45
IV.2 Dimensionnement.....	45
IV.2.1 Profil de consommation.....	46
IV.2.2 Emplacement des modules.....	46
IV.2.3 Onduleur.....	47
IV.2.4 Batteries.....	47
IV.3 Résultats de la simulation.....	48
IV.3.1 Utilisation de l'Energie PV.....	50
IV.3.2 Couverture de la consommation.....	50
IV.3.4 Bilan Energétique de l'installation.....	50
IV.3.5 Tableau du cashflow par année d'utilisation.....	51
IV.4 Conclusion.....	53
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>54</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE.....</b>	<b>55</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>58</b>

## **INTRODUCTION GENERALE**

---

La production de l'énergie a toujours constitué un défi de taille pour les sociétés humaine, en effet, leurs besoins en énergie ne cessent de progresser, par ailleurs la plus grande partie de cette énergie est produite actuellement à partir de gisements fossiles (pétrole, gaz, charbon ...) et qui de fait ne sont pas infinis, étant des sources très polluantes, leurs extraction ainsi que leurs utilisation pose le nouveau problème de la préservation de la planète.

Pour continuer et améliorer le développement de nos sociétés, il est impératif et de plus en plus urgent de trouver de nouvelles sources d'énergie qui se régénèrent suffisamment vite pour être considérées comme étant inépuisables et dont l'utilisation se doit d'être propre.

Plusieurs idées ont été développées au cours du 20ème et en début de ce 21ème siècle mais l'énergie du soleil reste la plus répandue sur la surface de la terre et la plus accessible, elle peut être utilisée directement sous forme thermique ou convertie en énergie électrique par effet photovoltaïque. Cette conversion, bien qu'elle soit connue depuis longtemps, reste au stade anecdotique et ne se développe pas encore à un stade important notamment à cause du coût élevé des capteurs et des installations.

La conversion de la lumière en électricité – aussi appelé effet photovoltaïque - a été découverte par E. Becquerel en 1839. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'un capteur constitué de matériaux dont les électrons sont sensibles à l'énergie contenue dans les photons. Ce capteur se présente à l'échelle élémentaire sous forme d'une cellule nommée la cellule photovoltaïque. La quantité d'énergie ainsi générée peut varier en fonction du matériau utilisé, des paramètres géométriques du capteur et de sa capacité à collecter les électrons excités avant leur recombinaison dans le matériau.

L'association possible de plusieurs cellules en série/parallèle permet théoriquement d'adapter la production de l'énergie PV à la demande ; on parle alors de générateur photovoltaïque GPV.

Le travail effectué dans ce mémoire porte sur la présentation ainsi que le dimensionnement d'une installation photovoltaïque répondant aux besoins d'un foyer ordinaire ; pour se faire, nous l'avons structuré de la manière suivante :

Dans le premier chapitre, nous allons présenter brièvement quelques notions élémentaires du rayonnement solaire, ces unités de mesures ainsi que les instruments qui nous permettent de le calculer, nous allons ensuite expliquer physiquement le phénomène photovoltaïque, les principes de fonctionnement d'une cellule PV, nous allons enfin simuler à l'aide d'un logiciel spécialisé (à savoir PC1D) les réponses d'une cellule PV face à une excitation donnée, déterminer ces caractéristiques ainsi que sont rendement quantique et électrique.

Dans le deuxième chapitre, nous allons essayer d'exposer les domaines d'utilisation ainsi que les réalisations les plus poussées, bref l'état de l'art.

Le troisième chapitre sera consacré au dimensionnement d'une installation qui doit alimenter un foyer isolé dans la région de Tlemcen, nous allons pour ceci exposer les calculs

basic pour déterminer les taille des différents composants de l'installation, ensuite nous allons utiliser un logiciel spécifique de dimensionnement, nous allons ensuite comparer et discuter les résultats.

Le quatrième chapitre sera consacrer a une installation hybride, pour notre cas, nous avons choisi une installation raccordée au réseau électrique de basse tension, nous allons essayer d'expliquer ce qui différencie une installation en système isolé d'une installation hybride, exposer les avantages et inconvénients de chaque installation.

On terminera notre travail par une conclusion générale.

## **CHAPITRE I**

---

# **FONCTIONNEMENT PHYSIQUE D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAIQUE**



## I.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons présenter les bases indispensables pour la compréhension du fonctionnement de la cellule solaire et l'influence des paramètres (température, ensoleillement, dopage.....) sur les caractéristiques tension-courant, finalement nous allons traiter les résultats obtenus par simulation à l'aide du logiciel PC1D

## I.2 Notions élémentaires sur le rayonnement solaire :

I.2.1 **rayonnement solaire :** Le rayonnement solaire désigne l'ensemble des ondes électromagnétiques [1] émises par le Soleil. Il se compose donc d'ultraviolets, de la lumière visible, mais également d'ondes radio en plus de rayons cosmiques. [2]

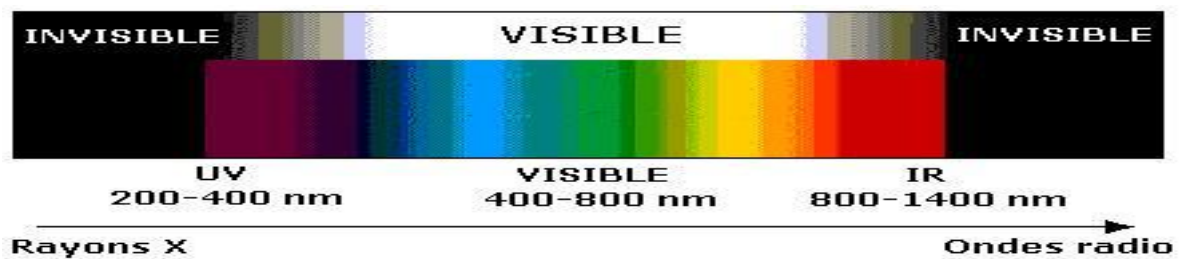
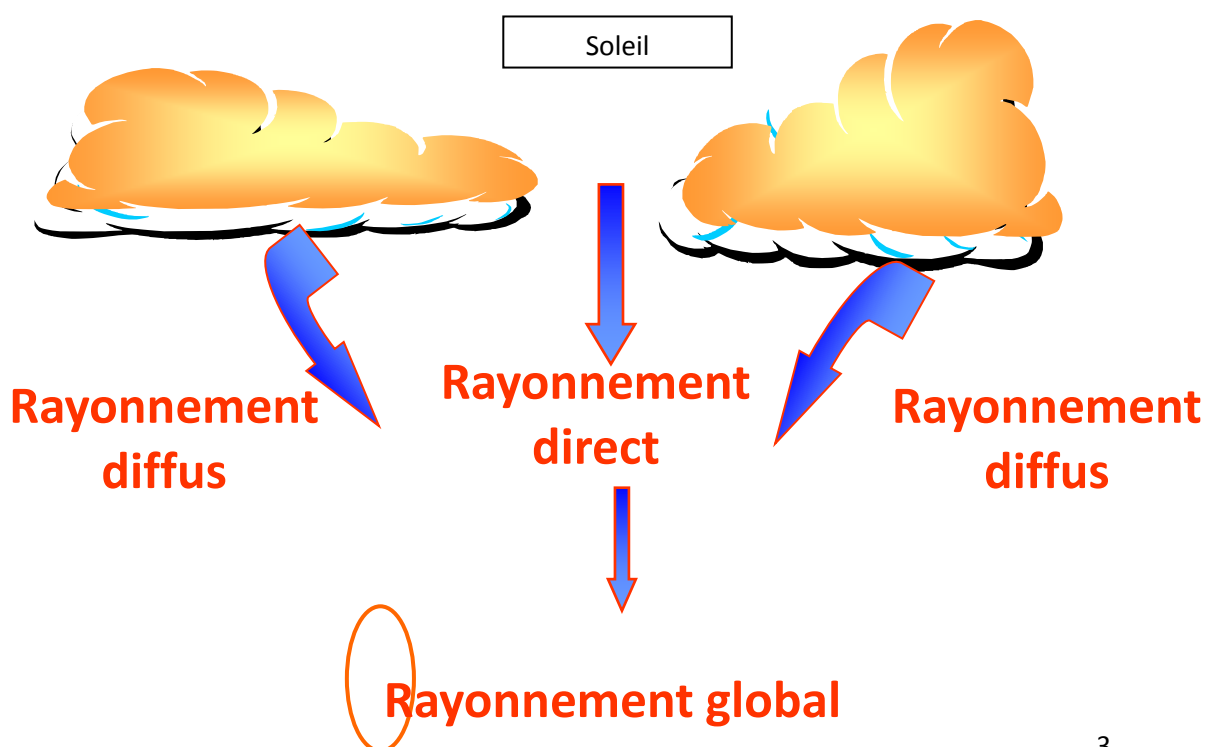


Figure : I.1

Une partie du rayonnement solaire émis parvient jusqu'à la Terre, où des ondes sont réfléchies par l'ionosphère (les ondes décamétriques et certains rayons ultraviolets), tandis que d'autres arrivent à la surface des nuages, des océans ou des continents. Elles vont alors être plus ou moins réfléchies selon l'albédo de la surface frappée. Celles qui ne le sont pas sont alors absorbées sous forme de chaleur ou exploitées par des organismes vivants, comme les végétaux pratiquant la photosynthèse. [3]



### I.2.2 Les unités de mesure du rayonnement :

Les unités de mesure du rayonnement solaire sont :

- Le joule J :

$$1 \text{ J} = 1 \text{ newton} * 1 \text{ m}$$

$$= 1 \text{ volt} * 1 \text{ ampère} * 1 \text{ m}$$

- Le Kilowatt-heure kWh :

$$1 \text{ kWh} = 3\,600\,000 \text{ J} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J (MJ)}$$

$$1 \text{ Wh} = 3600 \text{ J}$$

Pour les installations photovoltaïques, on utilise généralement le kWh et le rayonnement est mesuré par des instruments spécifiques par exemple :

**Le pyranomètre :** Cet instrument est destiné à mesurer le rayonnement solaire (longueurs d'onde de 0,3-3 microns) global (direct+diffus) parvenant depuis toutes les directions sur une surface plane.

Figure : I.1



**Le pyréliomètre :** Il est destiné à la mesure du rayonnement solaire direct. Il doit suivre le soleil pour mesurer uniquement le rayonnement direct en évitant la composante diffuse

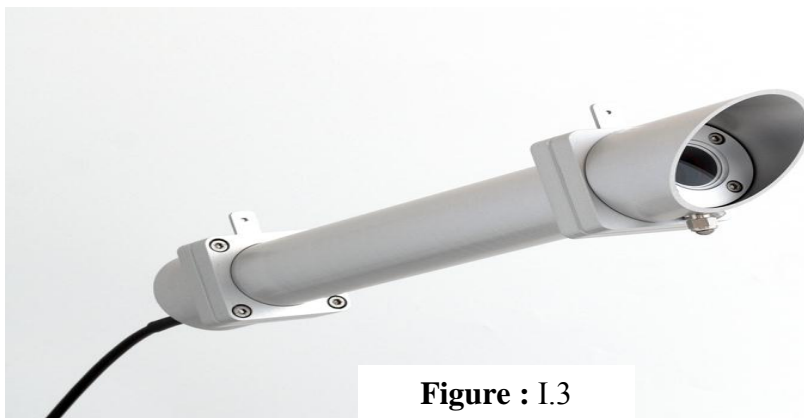


Figure : I.3

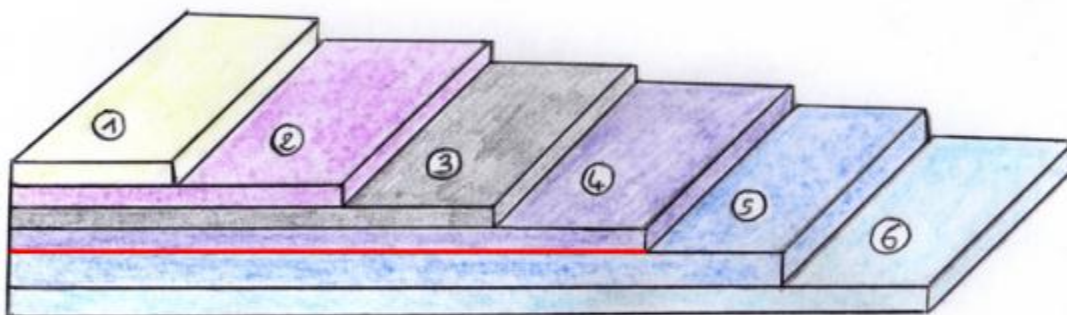
### I-3 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Dans ce qui suit, nous allons essayer d'expliquer comment fonctionne une cellule solaire. Notre démarche étant de montrer la technique la plus utilisée à ce jour, malgré les différents moyens de recueillir de l'énergie solaire, nous allons développer sur la cellule au silicium. Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque au silicium consiste à combiner trois phénomènes physiques:

#### 1.3.1 La structure de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est constituée de plusieurs couches. On trouve au centre de cette cellule, une couche avec porteurs de charges libres négative (N) en contact avec une autre couche avec porteurs de charges libres positives (P). De part et d'autre du cœur de la cellule, on a une couche conductrice (K) autrement dit une grille métallique, puisqu'il faut que cette couche soit conductrice et ne subisse pas des phénomènes de corrosion. On a donc une couche qui sert de cathode (pôle +) recouvrant la couche semi-conductrice dopée N et une couche qui joue le rôle de l'anode (pôle -) en dessous la couche semi-conductrice P. Aussi le silicium est très réflécheur, on place donc un revêtement anti-réflexion sur le dessus de la cellule. Enfin on trouve une couche de verre qui protège la cellule. Ces couvertures de protections sont indispensables car la cellule est très fragile. L'épaisseur totale de la cellule est de l'ordre du millimètre. Pour finir, on relie les cellules entre elles, constituant alors le panneau solaire, afin d'obtenir une puissance suffisante. [4]

#### Structure de la cellule photovoltaïque



- ① : Verre
- ② : revêtement anti-réflexion
- ③ : Grille métallique conductrice (pôle +)
- ④ : couche semi-conductrice dopée N
- ⑤ : couche semi-conductrice dopée P
- ⑥ : couche conductrice en métal (pôle -)
- : jonction entre (N) et (P)

Figure : I.4

### ***I.3.2 Le fonctionnement :***

#### **a-L 'absorption de la lumière dans le matériau :**

La lumière est composée de photons. Les photons sont des éléments capables de traverser la lumière et de la pénétrer. Plus généralement un rayon lumineux qui arrive sur un objet peut subir trois événements optiques : [5]

- **la réflexion:** La lumière est renvoyée par la surface de l'objet
- **la transmission:** La lumière traverse l'objet
- **L'absorption :** La lumière pénètre dans l'objet et n'en ressort pas, l'énergie est alors restituée sous une autre forme [6]

#### **b- Le transfert de l'énergie lumineuse aux électrons :**

Les charges élémentaires qui vont produire le courant électrique sous illumination sont des électrons, (Charge  $1.6 \times 10^{-19}$ ) charges négatives élémentaires contenues dans la matière semi-conductrice. Tout solide est en effet constitué d'atomes qui comprennent chacun un noyau et un ensemble d'électrons gravitant autour.

Ce sont les électrons des couches électroniques périphériques qui vont absorber l'énergie des photons, ce qui les libère de l'attraction électrostatique (et gravitationnelle) du noyau de l'atome.

L'énergie d'un photon d'un certain rayonnement est donnée par une relation simple puisqu'elle est proportionnelle à la fréquence du rayonnement utilisée. La constante universelle qui lie ces deux grandeurs est " h ", la constante de Planck. La constante de Planck a pour unité la fraction de l'énergie sur un temps, c'est-à-dire le Joule-seconde (J.s). Sa valeur, dans le système international d'unités, est :

$$h=6,6261.10^{-34} \text{ J.s.}$$

On a donc la formule:  $E = h .f$

L'effet photoélectrique est donc l'émission d'électrons par un métal quand il est exposé à des radiations lumineuses, on doit son explication à Einstein, lui-même inspiré par Maxwell. Les électrons libérés sont ensuite susceptibles de produire un courant électrique.

### 1.3.3 Les semi-conducteurs :

L'énergie lumineuse des rayons solaire est transformée en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électron et l'autre un déficit d'électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p.

La conductivité électrique désigne la capacité d'un corps à conduire un courant électrique lorsqu'une tension lui est appliquée.

On peut classer les matériaux selon trois types:

- les isolants, comme le verre qui ne conduisent pas le courant
- les conducteurs, principalement les métaux, qui conduisent le courant
- les semi-conducteurs dont la conductance varie en fonction de facteurs

Un matériau semi-conducteur est un matériau à l'état solide ou liquide, qui conduit l'électricité à température ambiante, mais moins aisément qu'un métal conducteur. Exemples de semi-conducteurs:

- Silicium
- Germanium
- Arséniure de gallium

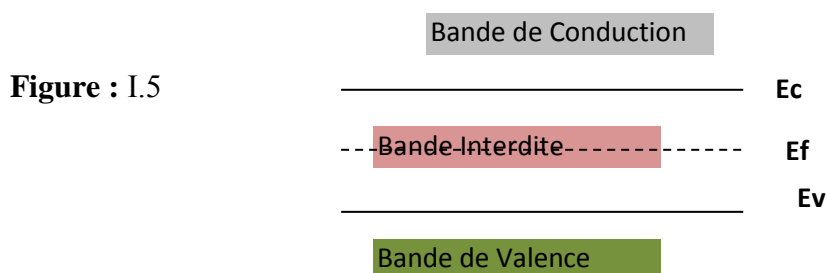
## 1.4 Principe de fonctionnement :

### 1.4.1 Théorie :

Les matériaux semi-conducteurs : ce sont des corps dont la résistivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants. Les quatre électrons de valence du silicium permettent de former quatre liaisons covalentes avec un atome voisin. Dans ce cas, tous les électrons sont utilisés et aucun n'est disponible pour créer un courant électrique.

Les semi-conducteurs intrinsèques : Les électrons situés sur la couche la plus éloignée du noyau, qui participent aux liaisons covalentes peuvent, sous l'effet de l'agitation thermique, devenir porteur de charge.

Le diagramme énergétique d'un semi-conducteur intrinsèque est composé de bandes d'énergie que les électrons peuvent occuper, on peut la représenter comme suit : [7]



**Bande de Valence** : A l'état fondamental ( $T= 0$  K) tous les électrons se trouvent dans cette bande. Elle est d'une largeur d'une dizaine d'eV. La limite supérieure de la BV est noté  $E_v$  [7]

**Bande de Conduction** : BC représente le premier état excité. Elle est vide à 0 K. Sa limite inférieure est notée  $E_c$ . [7]

**Bande Interdite** : c'est La région comprise entre les bandes BV et BC, elle ne contient aucun état susceptible de recevoir un électron. Sa largeur dépend su matériaux utilisé, par exemple pour le silicium cristallin elle est de 1,08 eV. [7]

$E_f$  : un paramètre (homogène à une énergie) appelé niveau de Fermi et qui se trouve dans la bande interdite. [7]

Pour franchir la bande interdite, l'électron doit acquérir suffisamment d'énergie (thermique, photon, ...) Mais le nombre d'électrons libres dans un semi-conducteur intrinsèque reste très faible car le nombre de trous et égal au nombre d'électrons :

$$n = \int_{BC} N(E)f(E)dE \quad (I.2)$$

On peut l'écrire alors sous la forme :

$$n = f(E_c)N(E_c) \quad (I.3)$$

Ou :

$n$  : Nombre d'électrons dans la BC

$N(E)$  : Densité d'Etat effective dans la bande de conduction

$F(E)$  : Probabilité pour qu'un état d'énergie  $E$  soit occupé, elle est donnée par la statistique de Fermi Dirac :

$$f(E) = \frac{1}{1+e^{-\frac{E-E_f}{kt}}} \quad (I.4)$$

Ainsi, un semi-conducteur intrinsèque présente de faibles propriétés électriques, Pour augmenter la conductivité on y introduit des impuretés. Ce procédé est appelé dopage [8]

#### 1.4.2 Le dopage et la jonction P.N :

Il peut être illustré par l'exemple suivant, qui présente le cas d'une cellule au silicium :

La couche supérieure de la cellule est composée de silicium dopé par un élément de valence supérieure dans la classification périodique, c'est à dire qui possède plus d'électrons sur sa couche de valence que le silicium. Le silicium possède 4 électrons sur sa couche de valence : on peut donc utiliser des éléments de la colonne de l'oxygène, par exemple le Phosphore P. Cette couche possédera donc en moyenne une quantité d'électrons supérieure à une couche de silicium pur. Il s'agit d'un semi-conducteur de type N. [8]

La couche inférieure de la cellule est composée de silicium dopé par un élément de valence inférieure au silicium. Il peut s'agir de Bore B. Cette couche possédera donc en

moyenne une quantité d'électrons inférieure une couche de silicium pur. Il s'agit d'un semi-conducteur de type P.

Lorsqu'on met ces deux semi-conducteurs en contact (de manière à ce qu'il puisse y avoir conduction), on crée une jonction PN, qui doit permettre le passage des électrons entre les deux plaques. Cependant, dans le cas d'une cellule photovoltaïque, le gap du semi-conducteur de type N est calculé de manière à ce que le courant ne puisse pas s'établir seul : il faut qu'il y ait un apport d'énergie, sous forme d'un photon de lumière, pour qu'un électron de la couche N soit arraché et vienne se placer dans la couche P, créant ainsi une modification de la répartition de la charge globale dans l'édifice. [9]

Deux électrodes sont placées, l'une au niveau de la couche supérieure et l'autre au niveau de la couche inférieure : une différence de potentiel électronique et un courant électrique sont créés

L'effet repose donc à la base sur les propriétés semi-conductrices du matériau et son dopage afin d'en améliorer la conductivité.

Pour modifier les propriétés conductrices du silicium on y introduit des traces d'un autre élément appelé impureté: c'est le dopage.

Le silicium est traité d'une certaine manière, on dit dopé, cette technique permet au silicium de jouer le rôle d'une diode, c'est-à-dire que les électrons ne pourront "passer" que dans un unique sens.

La technique de dopage d'un semi-conducteur consiste à lui ajouter des impuretés, c'est-à-dire des éléments ayant un nombre différent d'électrons de valence. Les électrons porteurs de charge, générés par la lumière du soleil, sont partiellement perdus dans le volume du silicium à cause de la présence d'impuretés résiduelles (atomes de fer, titane...). [10]

Les chercheurs développent donc des procédés permettant de piéger ces atomes dans des zones inactives.

Les atomes du matériau de dopage, ou dopant (donneurs ou accepteurs d'électrons), et ceux du silicium ont un nombre différent d'électrons périphériques. Voici la structure électronique des atomes de phosphore, de silicium et de l'aluminium : [11]

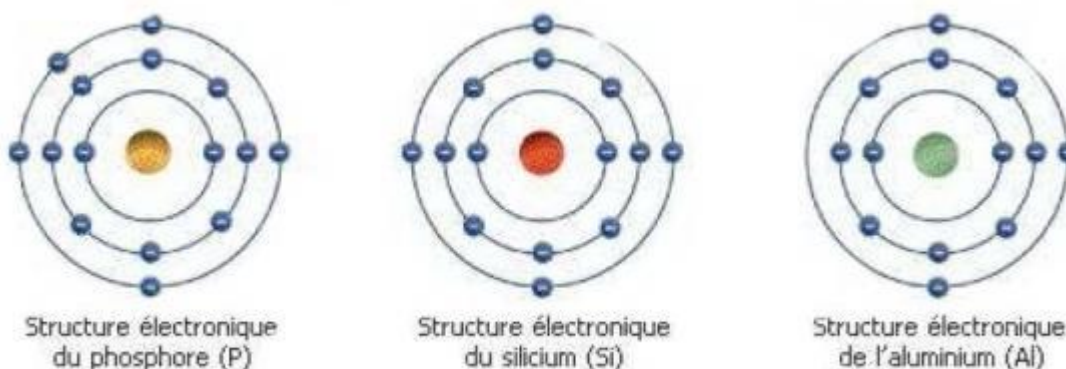
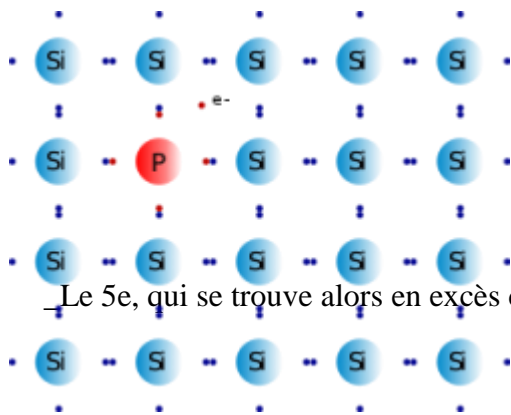


Figure : I.6



### Le cas de silicium de type N:

*Exemple 1: Dopage au phosphore [8]*



Celui-ci comporte cinq électrons, soit un de plus que le silicium ( sur leur couche externe: électron de valence).

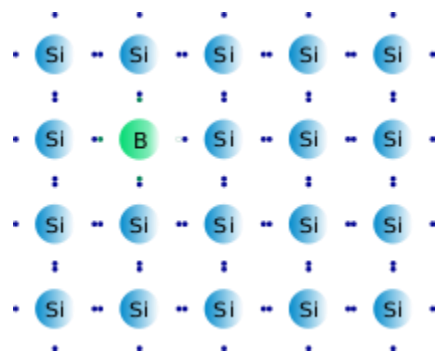
Chaque atome P s'insère entre les atomes de Si.

4 électrons P se couplent chacun à un des 4 électrons externes d'un atome de Si voisin

On a ainsi formé un matériau semi-conducteur dit de type N (charges négatives en excès)

### Le cas du silicium de type P:

*Exemple 2: Dopage au bore [8]*



Le dopage produit ainsi des particules électriques chargées positivement (type P) ou négativement (type N).

Or le déplacement d'électrons, créé par l'énergie des photons, est synonyme de production d'électricité. Une tension se crée alors en présence de lumière aux bornes de la cellule. Si l'on ferme le circuit à l'aide de n'importe quel dipôle telle une lampe, le courant circule dans le circuit. Il est important de noter que la tension est presque constante tandis que l'intensité varie proportionnellement à la quantité de lumière reçue.

Les matériaux ainsi dopés sont appelés semi-conducteurs extrinsèques. [8]



### Eclairement par une source lumineuse :

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 BV vers BC. Il reste des trous p dans BV. Mais rien ne permet de séparer les paires électron-trou ainsi formées, leur recombinaison est très rapide. On ne peut pas recueillir d'énergie électrique de cette façon. Il faut donc trouver un moyen de séparer les charges initialement formées. Ceci est réalisé dans un dispositif appelé jonction PN [12]

#### I.4.3 Jonction PN :

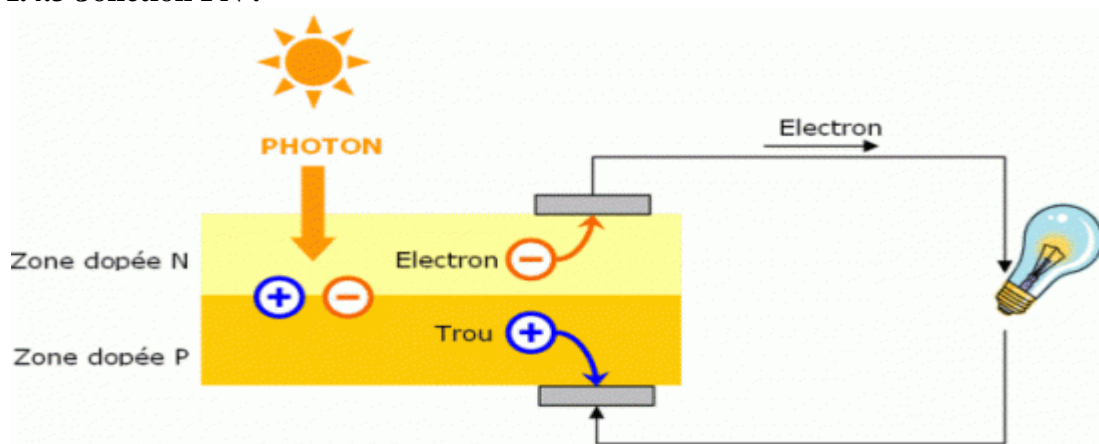


Figure : I.7

Lorsqu'un semi-conducteur dopé p est mis en contact avec un semi-conducteur dopé n, les électrons en excès dans la région n diffusent vers l'interface. Il en résulte une zone de charge d'espace dans une région d'environ  $1 \mu\text{m}$  autour de l'interface, ce qui produit un champ électrique qui peut être calculé grâce à l'équation de Poisson. La barrière de potentiel au niveau de la jonction est donnée par :

$$V_i = \frac{E_{f_n} - E_{f_p}}{q} \quad (\text{I.5})$$

$E_{f_n}$  et  $E_{f_p}$  sont les niveaux de Fermi respectivement dans les régions n et p ; q est la charge élémentaire.

La jonction PN est le dispositif utilisé dans les cellules photovoltaïques. En effet, quand des photons sont absorbés dans la zone de charge d'espace, les paires électron-trou formées sont séparées par le champ électrique de la jonction qui fait migrer les électrons vers la région n et les trous vers la région P.

La séparation des paires électron-trou par le champ électrique de la jonction PN fait passer au travers de celle-ci un courant  $j_g$  (courant généré par la lumière) depuis la région N vers la région P. Simultanément la région P se charge positivement et la région N négativement, créant ainsi une polarisation de la cellule qui en retour fait passer au travers de la jonction un courant inverse  $J_i$  désigné opposé à celui de  $j_g$ . S'il n'y a pas de connexions

extérieures,  $j_g = j_i$ . Par contre, si la cellule est reliée à un circuit d'utilisation simulé par une résistance de charge  $R_u$ , une partie de  $j_g$  passe par le circuit extérieur.

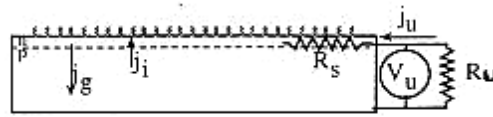


Figure : I.8

On a :

$$j_g = j_i + j_u \quad (I.6)$$

Où  $j_u$  est le courant passant dans le circuit d'utilisation. L'équation fondamentale de la jonction p-n devient :

$$j_s = j_s (e^{qV/kT} - 1) + j_u \quad (I.7)$$

$V$  est ici la tension de polarisation due au passage du courant  $j_g$ . La chute de tension dans le circuit s'écrit donc :

$$V = j_u R_s + V_u \quad (I.8)$$

Où  $V_u$  est la tension aux bornes du circuit d'utilisation et  $R_s$  la résistance interne de la cellule qui peut être considérée comme étant en série.

La combinaison des relations précédentes conduit à l'équation fondamentale de la cellule photovoltaïque :

$$V_u = \left[ \frac{kT}{q} \right] \log \left[ 1 + \frac{j_g - j_u}{j_s} \right] - R_s j_u \quad (I.9)$$

Le courant de court-circuit  $j_{cc}$  est le courant qui passe dans le circuit d'utilisation si  $R_u = 0$ .  $j_{cc}$  est proportionnel à  $j_g$  selon (7), donc proportionnel au flux lumineux. Par suite des pertes électriques, on a toujours  $j_{cc} < j_g$ .

La tension aux bornes de la cellule est maximum quand  $j_u = 0$  soit  $R_u = \infty$ . On définit ainsi la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  :

$$V_{co} = \left[ \frac{kT}{q} \right] \log \left[ 1 + \frac{j_{cc}}{j_s} \right] \quad (I.10)$$

On notera que la puissance électrique fournie par la cellule,  $P = V_u j_u$ , dépend de la résistance  $R_u$  du circuit extérieur. Ceci est dû au fait que les pertes électriques dans la cellule dépendent du "point de fonctionnement", lui-même déterminé par les caractéristiques du circuit extérieur. Soit  $P_{max}$  la puissance fournie par la cellule dans les conditions optimales. La grandeur  $P_{max}/V_{co}j_{cc}$  s'appelle facteur de remplissage (fill factor) et est notée FF [13]. Elle est toujours inférieure à 1 (Cf figure 1-7) et joue un rôle important en intervenant dans le calcul du rendement de la cellule. [14]

### I-5 Simulation et caractéristiques d'une cellule photovoltaïque :

En utilisant le logiciel PC1D [15], nous allons vous présenter l'influence du dopage, de l'épaisseur de la couche N ainsi que l'influence de la texturation sur une cellule Si d'une surface de 100cm<sup>2</sup> et d'une texture de 3.000 um et en utilisant à chaque simulation deux types d'excitation :

1<sup>er</sup> type d'excitation : one-sun .exc

2eme type d'excitation : scan .qe .exc

Aussi, pour chaque simulation, nous allons calculer :

1- Le facteur de forme FF dont la formule est donné comme suit :

$$FF = P_{max} / V_{co} * I_{bcc} \quad (I.11)$$

2- Le rendement électrique R dont la formule est donné comme suit :

$$R = P_{max} / S * E \quad (I.12)$$

Ou :

S : surface de la cellule

E : irradiation incidente (AM1.5) 1000Wh/m<sup>2</sup>

### I.5.1 Influence du Dopage, épaisseur constante : 300 um

**Dopage 1 :** 2.87 e+020cm<sup>-3</sup> ; Type N

**Excitation :** one-sun .exc

**Résultats :**

I<sub>bcc</sub> = -3.183 A

V<sub>co</sub> = 0.5920 V

P<sub>max</sub> = 1.362 w

FF = 71.8%

R = 13.62%

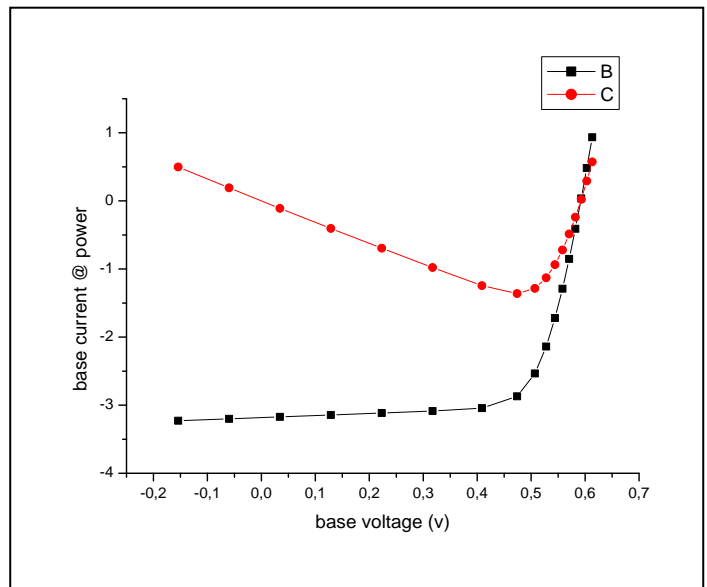


Figure I.9 : Les caractéristiques I ,V,P

**Excitation :** scan .qe .exc

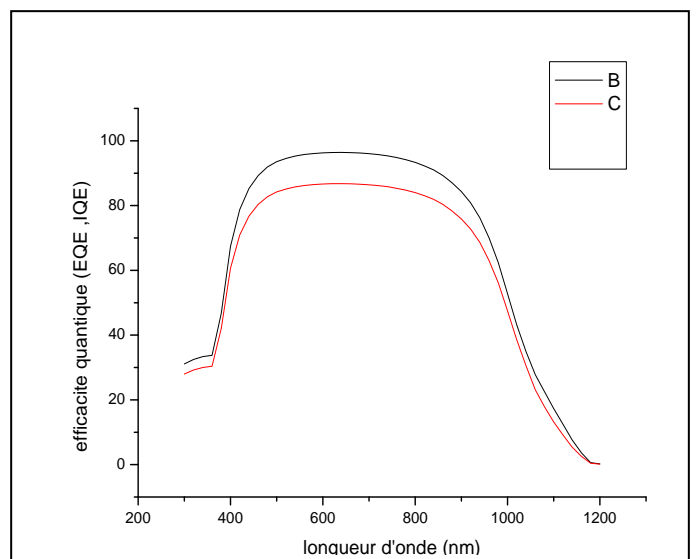


Figure I.10 : La réponse du rendement quantique

**Dopage 2 :**  $25 \text{ e}+020\text{cm}^{-3}$  ; Type N

**Excitation :** one-sun .exc

**Résultats :**

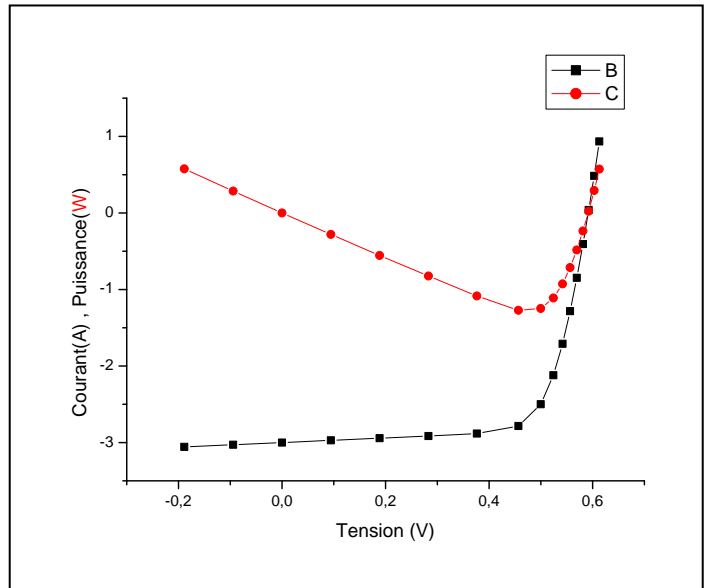
$I_{\text{bcc}} = -3.000 \text{ A}$

$V_{\text{co}} = 0.5915 \text{ V}$

$P_{\text{max}} = 1.287 \text{ w}$

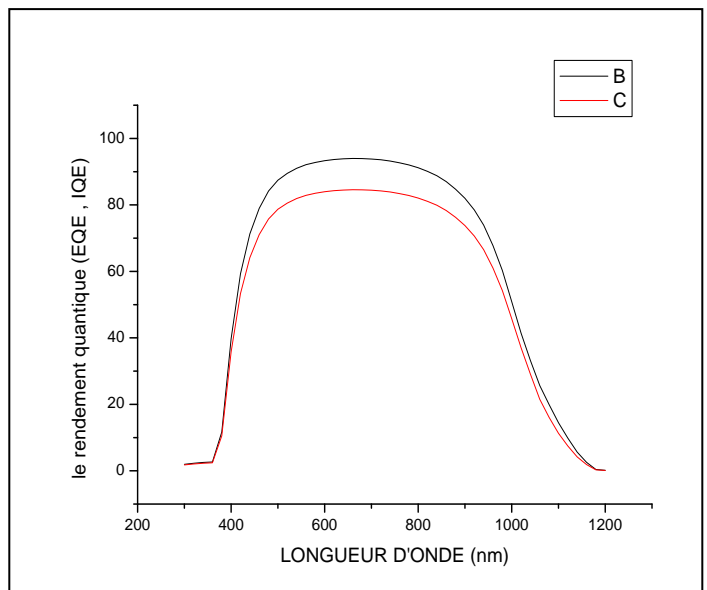
$\text{FF} = 72.52\%$

$R = 12.87\%$



**Figure I.11 :** Les caractéristiques I ,V,P

**Excitation :** scan .qe .exc



**Figure I.12 :** La réponse du rendement quantique

**Dopage 3** :  $5 \times 10^{21} \text{cm}^{-3}$  ; Type N

**Excitation** : one-sun .exc

**Résultats** :

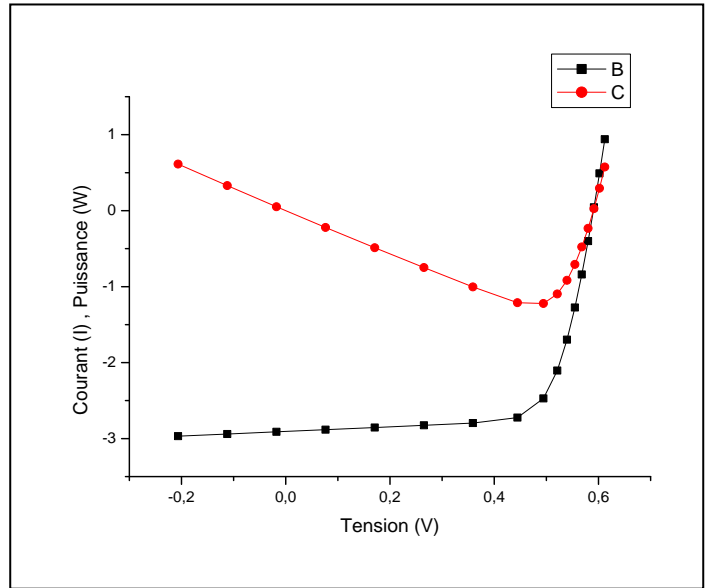
$I_{\text{bcc}} = -2.906 \text{ A}$

$V_{\text{co}} = 0.5902 \text{ V}$

$P_{\text{max}} = 1.234 \text{ w}$

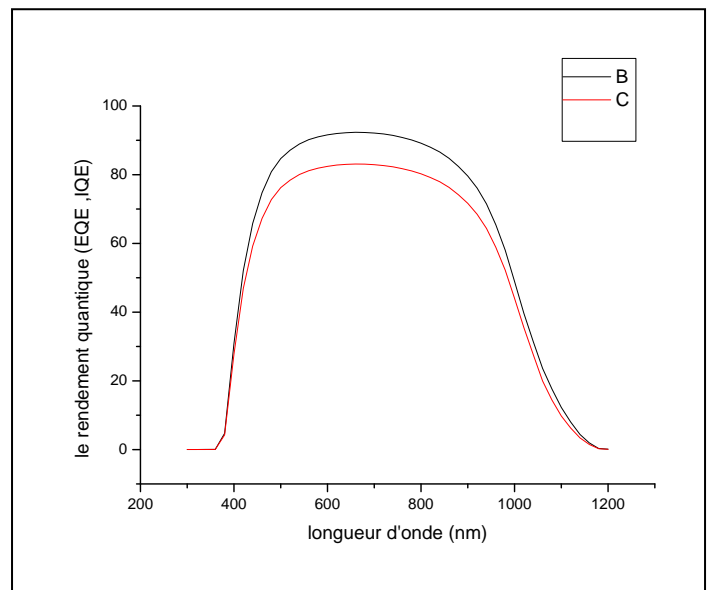
$\text{FF} = 71.94\%$

$R = 12.34\%$



**Figure I.13** : Les caractéristiques I ,V,P

**Excitation** : scan .qe .exc



**Figure I.14** : La réponse du rendement quantique

### I.5.2 Influence de l'épaisseur de l'émetteur, Dopage Constant : $2.87 \text{ e}+020\text{cm}^{-3}$ ; Type N

**Epaisseur 1 :** 0.1049  $\mu\text{m}$

**Excitation :** one-sun .exc

**Résultats :**

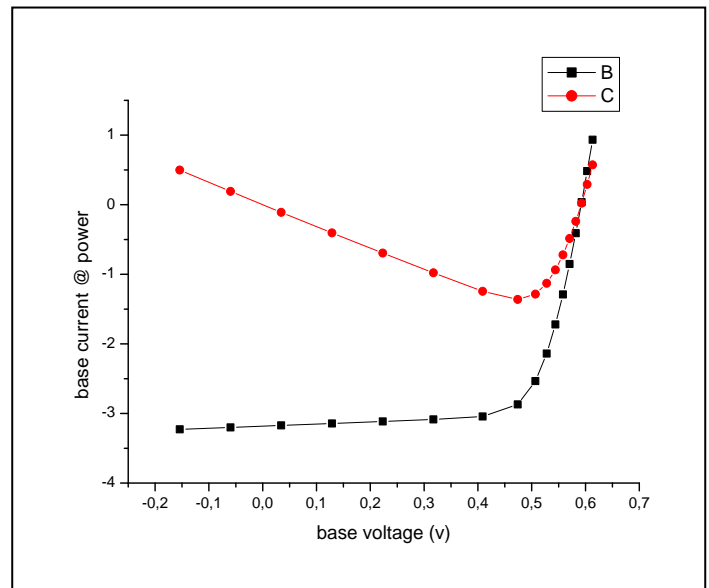
$I_{\text{bcc}} = -3.183 \text{ A}$

$V_{\text{co}} = 0.5920 \text{ V}$

$P_{\text{max}} = 1.362 \text{ w}$

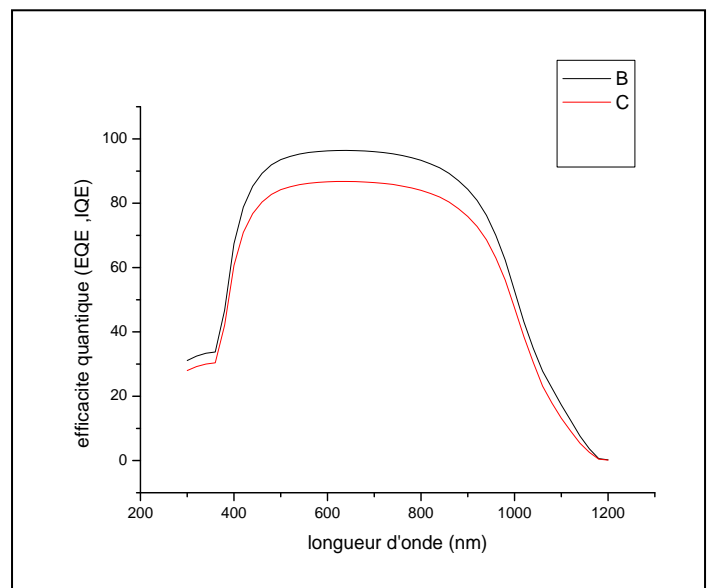
$\text{FF} = 72.28\%$

$R = 13.62\%$



**Figure I.15 :** Les caractéristiques I ,V,P

**Excitation :** scan .qe .exc



**Figure I.16 :** La réponse du rendement quantique

**Epaisseur 2 : 0.200 um**

**Excitation : one-sun .exc**

**Résultats :**

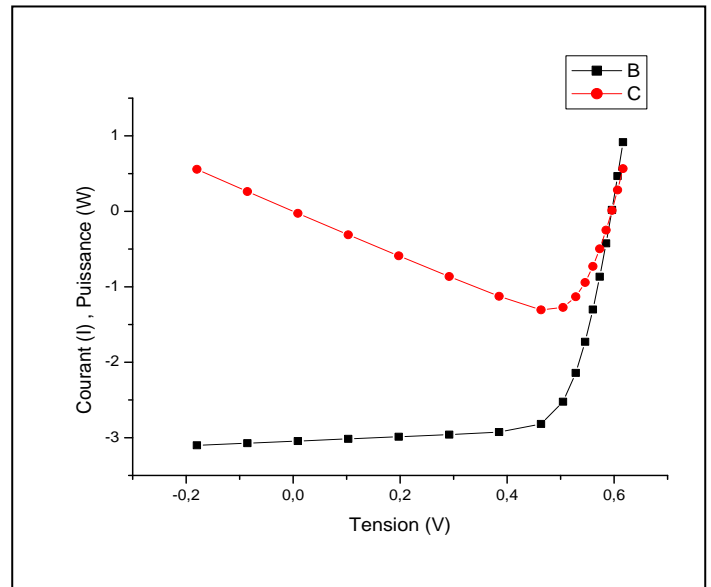
$I_{bcc} = -3.047 \text{ A}$

$V_{co} = 0.5956 \text{ V}$

$P_{max} = 1.318 \text{ w}$

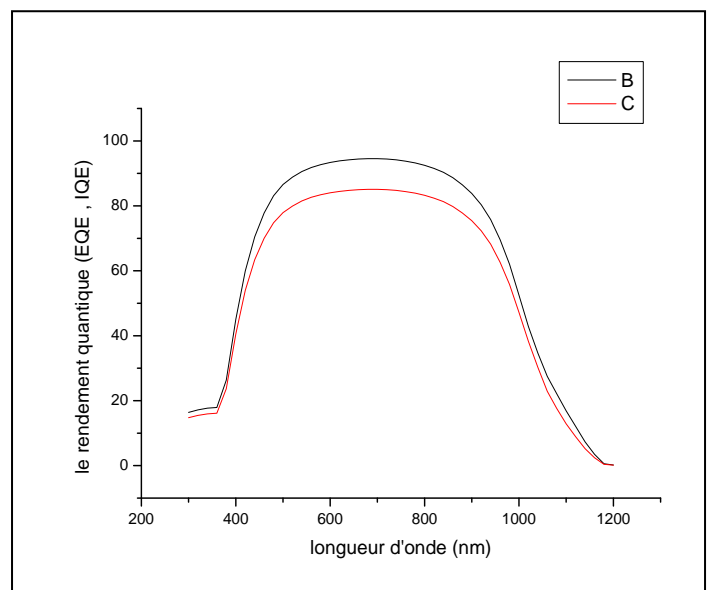
$FF = 72.62\%$

$R = 13.18\%$



**Figure I.17 : Les caractéristiques I ,V,P**

**Excitation : scan .qe .exc**



**Figure I.18 : La réponse du rendement quantique**

**Epaisseur 3 : 0.250  $\mu\text{m}$**

**Excitation : one-sun .exc**

**Résultats :**

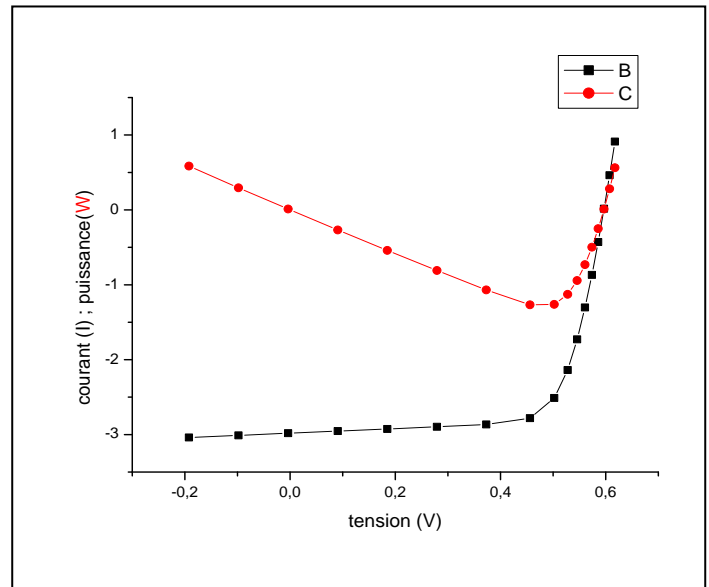
$I_{\text{bcc}} = -2.981 \text{ A}$

$V_{\text{co}} = 0.5964 \text{ V}$

$P_{\text{max}} = 1.290 \text{ w}$

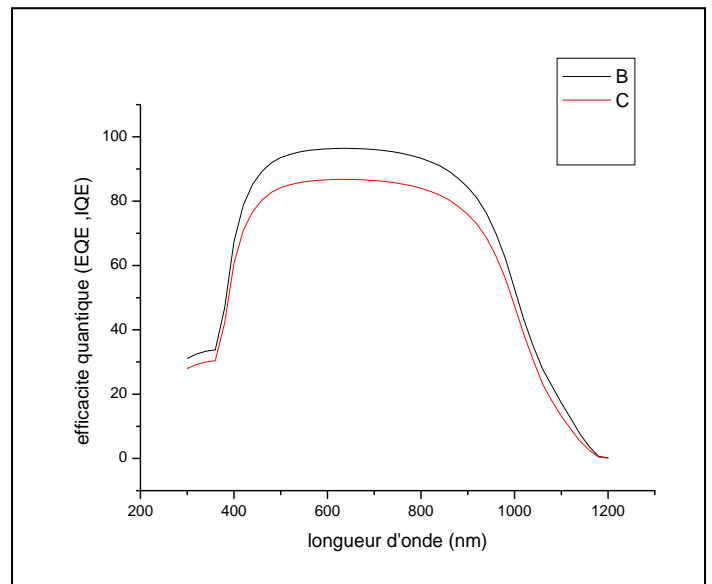
$\text{FF} = 72.55\%$

$R = 12.90\%$



**Figure I.19 : Les caractéristiques I ,V,P**

**Excitation : scan .qe .exc**



**Figure I.20 : La réponse du rendement quantique**

### 1.5.3 Evolution du rendement en fonction du profondeur de texturisation :

#### ➤ Surface texturée :

Les surfaces texturées utilisées dans toutes les structures étudiées sont composées de micro pyramides inversées de profondeur (depth)  $3\mu\text{m}$  et d'angle facial  $54,74^\circ$ . La texturisation est très importante, car elle permet de diminuer les pertes par réflexion du rayonnement incident. Nous avons texturé seulement la face avant, car l'autre face est considérée à l'obscurité



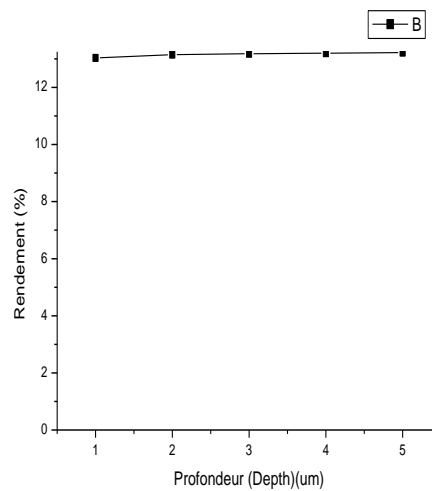
➤ **Intérêt de la texturisation :**

- provoque des réflexions multiples à la surface de la cellule
- augmente le trajet parcouru par le faisceau optique avant de ressortir de la cellule en le déviant :

➤ **Evolution du rendement en fonction de profondeur de texturation :**

Avec l'angle  $\Theta = 54.74^\circ$

Profondeur (um)	1	2	3	4	5
<b>I<sub>cc</sub> (A)</b>	3.008	3.038	3.047	3.052	3.056
<b>V<sub>co</sub>(V)</b>	0.5965	0.5958	0.5956	0.5954	0.5953
<b>P<sub>max</sub>(W)</b>	1.303	1.315	1.318	1.320	1.322
<b>FF(%)</b>	72.61	72.65	72.62	72.64	72.66
<b>R (%)</b>	13.03	13.15	13.18	13.20	13.22



**Figure : I.21**

➤ **Evolution du rendement en fonction de l'Angle de texturation : Profondeur 3um**

ongle( $\Theta$ )	25.50	38.65	54.74	70.55	85.45
<b>I<sub>cc</sub> (A)</b>	2.994	3.011	3.047	3.105	3.203
<b>V<sub>co</sub>(V)</b>	0.5987	0.5978	0.5956	0.5902	0.5669
<b>P<sub>max</sub>(W)</b>	1.302	1.308	1.318	1.328	1.294
<b>FF(%)</b>	72.63	72.66	72.62	72.46	71.26
<b>R (%)</b>	13.02	13.08	13.18	13.28	12.94

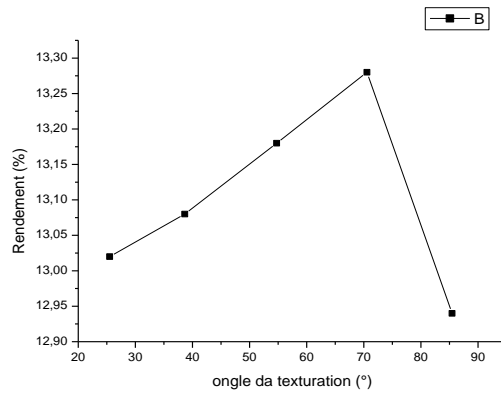


Figure : I.22

1.5.4 Récapitulation des résultats :

1- Evolution du rendement en fonction du dopage :

Dopage	2.87 e+020cm-3	25 e+020cm-3	5 e+21cm-3
Icc(A)	-3.183	-3.000	-2.906
Vco(v)	0.5920	0.5915	0.5902
Pmax(w)	1.362	1.287	1.234
Ren	13.62	12.87	12.34
FF	71.28	72.52	71.94

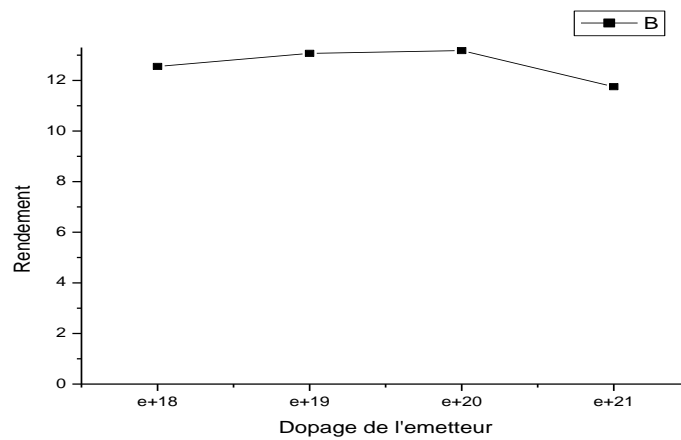
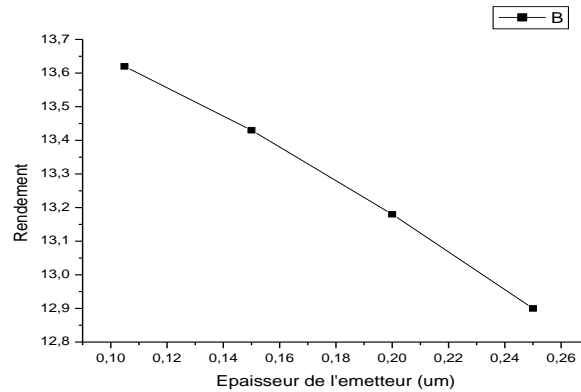


Figure : I.23

2- Evolution du rendement en fonction de l'épaisseur :

Epaisseur	0.1049	0.2000	0.2500
Icc(A)	-3.183	-3.047	-2.981
Vco(v)	0.5920	0.5956	0.5964
Pmax(w)	1.362	1.318	1.290
Ren	13.62	13.18	12.90
FF	72.28	72.62	72.55



**Figure I.24 :** Evolution du rendement en fonction de l'épaisseur

### 1.5.5 Conclusion :

Quelque soit la structure d'une cellule solaire, une optimisation de ses paramètres est nécessaire pour avoir un bon rendement. Habituellement, les paramètres à optimiser sont l'épaisseur de la cellule, les niveaux et les profils de dopage, la configuration des contacts et le confinement optique. Les valeurs des paramètres optimaux dépendent, bien sûr, de la structure de la cellule solaire, de la qualité du matériau, de la vitesse de recombinaison en surface (faces avant et arrière), etc... L'optimisation de la cellule solaire comprend donc l'étude de l'influence de ces paramètres sur le rendement afin d'obtenir une structure conduisant au rendement maximum.

## **CHAPITRE II**

---

### **ETAT DE L'ART**

## I. Introduction :

Les cellules photovoltaïques sont parfois utilisées seules (éclairage de jardin, calculatrice, ...) ou bien regroupées sur des panneaux solaires photovoltaïques.

Elles sont très utilisées en remplacement des piles (dont l'énergie est de loin la plus chère pour l'utilisateur ; même pour le fabricant, un compartiment pile et la pile éventuellement fournie peuvent coûter plus cher qu'une cellule), pourvu que le dispositif ne réclame pas trop d'énergie par rapport à la surface qu'on peut raccorder au générateur photovoltaïque, et qu'il y ait assez de lumière pendant l'usage : les cellules ont envahi calculette, montres, gadgets, etc.

Dans le présent chapitre, nous allons essayer d'exposer les techniques de fabrication, les types de matériaux utilisés ainsi que les domaines d'application.

## II. Techniques de fabrication :

Le processus de fabrication standard des systèmes photovoltaïque présente plusieurs étapes. Les explications qui suivent valent pour la filière silicium cristallin. 88% du marché photovoltaïque était en effet encore basé sur les technologies du silicium cristallin. [16]

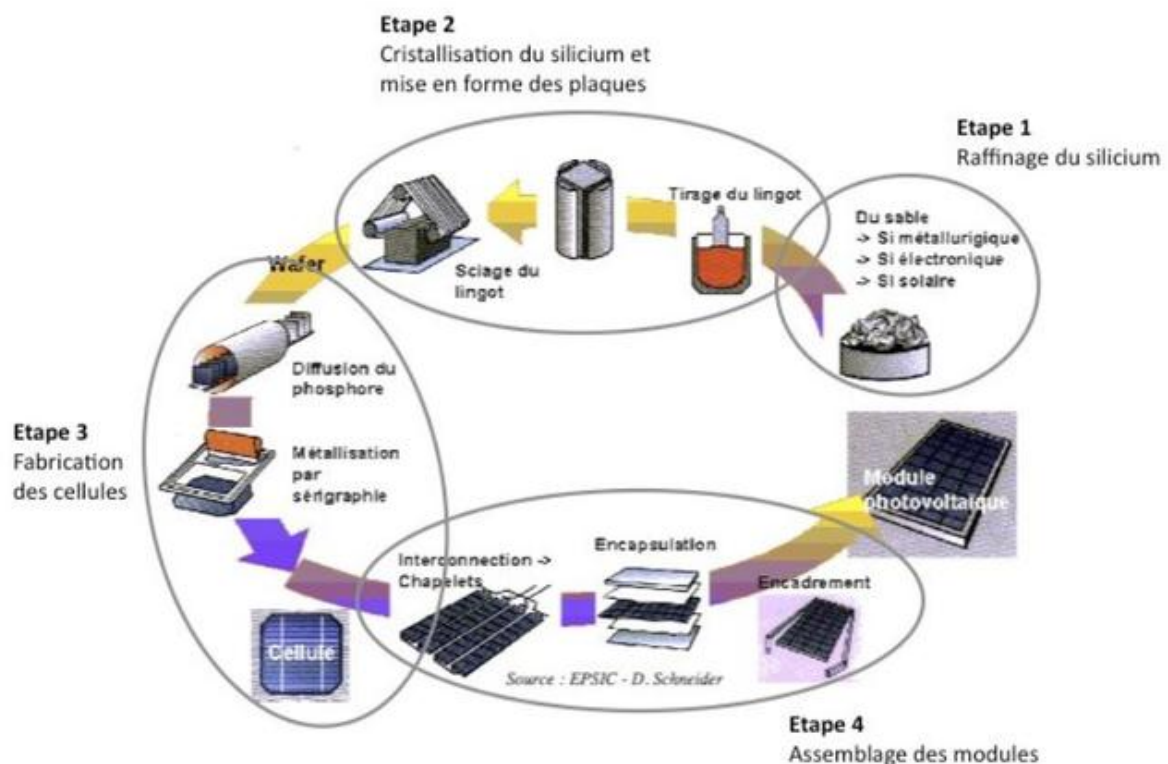


Figure II.1 : Processus de fabrication des systèmes photovoltaïques [17]

source : EPSIC - D.Schneider

## Etape 1 : raffinage du silicium

En 2010, la production de silicium poly cristallin a été de 145 000 tonnes, dont 83% pour l'industrie solaire (source US Geological Survey). (Attention : on utilise souvent abusivement le terme poly cristallin pour parler des modules multi cristallins, or le silicium poly cristallin n'intervient qu'au début pour ensuite être transformé en silicium monocristallin ou multi cristallin). Sur la base d'un besoin de 15t/MWc, l'industrie photovoltaïque a produit 8 GWc de panneaux photovoltaïques à base de silicium cristallin. L'obtention de ce matériau arrive en fin d'un processus de raffinage que l'on peut séparer en deux grandes étapes : [18]

- La transformation du quartz en silicium de **grade métallurgique** ou **MG-Si**.

Elle est réalisée dans un four à arc, outil typique de l'industrie métallurgique. La pureté du MG-Si est de l'ordre de 98 à 99%.

- La purification du silicium métal en silicium de **grade solaire** ou **SoG-Si**, d'une pureté de 99,9999%.

Elle est réalisée par le procédé Siemens, hérité de l'électronique et utilise des réacteurs chimiques pour synthétiser le silicium polycristallin ou poly-Si. De toute la chaîne de production des modules photovoltaïques, c'est l'étape la plus consommatrice en énergie. En raison du coût de cette étape et du fait qu'une pureté moindre peut être tolérée, des techniques pour produire le silicium solaire à partir de nouveaux procédés chimiques mais aussi métallurgiques, le procédé Elkem notamment, sont explorées.

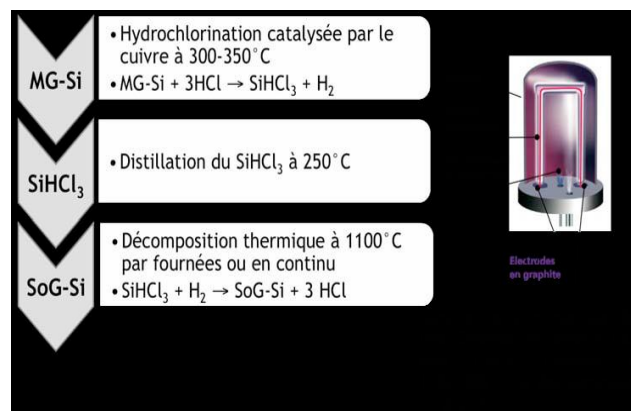


Fig. II.2 : Procédé Siemens [16]

- **Procédé Elkem :**

Il consiste en un traitement du silicium métallurgique par un laitier de silicate de calcium à haute température suivi d'un lessivage chimique à basse température. Les impuretés résiduelles sont collectées sur le dessus du lingot obtenu après une solidification directionnelle. [20]

## Etape 2 : cristallisation du silicium et la mise en forme des plaques

A ce stade et jusqu'à la fabrication du module sont mis en jeu des savoir-faire propres à l'industrie photovoltaïque.

Le silicium va être purifié encore une fois, dopé uniformément et découpé en plaques une fois refroidi. La technique de cristallisation consiste à solidifier progressivement le silicium polycristallin fondu de manière contrôlée. C'est dans la charge de silicium en fusion que sera ajouté l'élément dopant, généralement du bore qui donne un dopage de type p. Le matériau présente au final un réseau cristallin, qui est un arrangement ordonné des atomes de silicium.

L'élimination des impuretés se fait par ségrégation. Plus solubles en phase liquide que solide, les impuretés vont migrer vers les zones se solidifiant en dernier. Dans le cas d'un refroidissement par le bas, elles vont se concentrer sur le haut du lingot.

Pour la cristallisation, trois grandes voies sont possibles, selon le choix technologique fait par le fabricant.



Figure II.3 : Lingots de silicium monocristallin [16]  
source:Hespul

- Le tirage Czochralski, pour donner des lingots cylindriques de **silicium monocristallin (sc-Si)**.

Le silicium monocristallin est obtenu par croissance ou étirage d'un lingot cylindrique à partir d'un monocristal « souche » selon le procédé Czochralski ou CZ. Les cellules finales de silicium monocristallin ont un des meilleurs rendements (15%), mais pour une plus grande dépense énergétique à cette étape.

- La solidification directionnelle donne des briques de **silicium multicristallin (mc-Si)**.

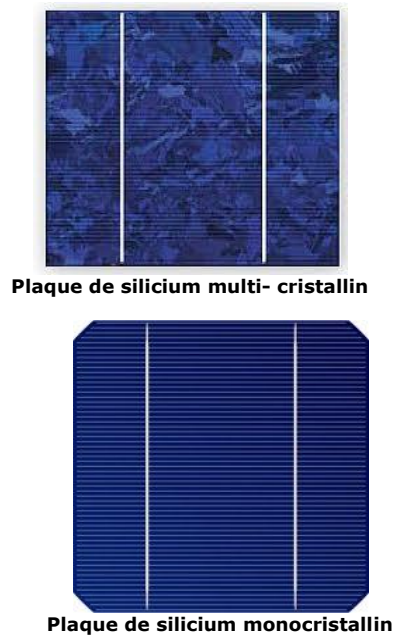
Le silicium multicristallin est obtenu par coulage en lingotière dans laquelle s'opère un refroidissement lent, de l'ordre de quelques dizaines d'heures. Sa mise au point est moins énergivore, et le rendement final des cellules est d'environ 12%.

**Le sciage des plaques (mc-Si et sc-Si) :** Les lingots monocristallins et les briques multicristallines sont après la première étape découpés en tranches par une scie à fil, à une épaisseur d'environ 250  $\mu\text{m}$ . L'opération est réalisée en présence de slurry, une solution organique contenant des abrasifs en suspension. Il faut souligner une perte importante de

matériau lors du sciage (30 à 40% non recyclé). Sur les schémas, on remarque que les coins du silicium monocristallin sont arrondis car la plaque est découpée dans un lingot cylindrique.

- Le tirage de ruban pour donner du **silicium multi- cristallin** en ruban.

Cette dernière option technologique combine les étapes de cristallisation et de mise en forme du silicium, et présente l'avantage de minimiser la perte matière. Il est obtenu par entraînement d'un ruban de silicium sur un support plan ou tubulaire à partir d'un bain de silicium fondu.



**Figure II.4** : Plaques de silicium [17]

### **Etape 3 : fabrication des cellules**

Une fois les plaques découpées la fabrication des cellules peut commencer, qui va permettre d'exploiter les propriétés de semi-conducteur du silicium et de transformer l'énergie lumineuse captée en énergie électrique.

La plaque doit être de l'ordre d'une centaine de microns pour absorber les photons incidents. La face arrière est dopée p+ par diffusion d'aluminium et joue aussi le rôle de conducteur ohmique avec l'électrode arrière. La zone avant est dopée n+. Une couche antireflet est déposée dessus.

Chaque fabricant développe sa propre chaîne de production, qui dépend de ses choix technologiques et économiques. L'enchaînement des étapes ci-dessous représente un procédé industriel standard auquel il faudra ajouter les sous-étapes de transport, nettoyage et mesure [18]

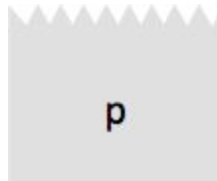


- **Décapage :**



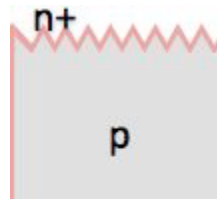
Les plaques dopées p à partir de bore lors de la cristallisation sont décapées dans un bain chimique afin d'éliminer les défauts superficiels créés par le sciage. Bain acide à base d'acide fluorhydrique HF, d'acide acétique CH<sub>3</sub>COOH et d'acide nitrique HNO<sub>3</sub>

- **Texturation :**



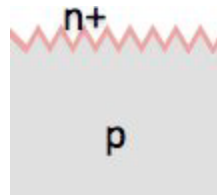
La texturation de la surface en petites pyramides ou entonnoirs permet d'améliorer la collecte des photons dans toutes les directions en réduisant la réflexion. On parle aussi de confinement optique et de Gravure sélective par un bain alcalin de soude NaOH ou de potasse KOH avec des additifs organiques du type alcool isopropylique IPA

- **Dopage :**



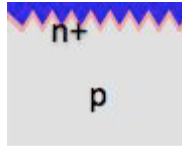
La zone dopée n est formée par diffusion de phosphore: couche n+ en surface et n à la jonction. Diffusion thermique de phosphore P à partir de trichlorure de phosphore POC<sub>l</sub> dans un four à passage, 800°C < T < 900°C, suivi d'un recuit, retrait de la couche résiduelle de silicate de phosphore dans un bain d'acide fluorhydrique HF

- **Bords de plaque :**



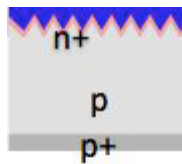
La couche n+ est retirée des bords de plaque (sur la tranche) pour séparer l'émetteur de la face arrière. Gravure plasma avec un mélange gazeux tétrafluorométhane CF<sub>4</sub> et oxygène O<sub>2</sub> soumis à un champ de radiofréquences

- **Anti-reflet :**



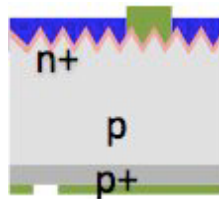
Une couche anti-reflet à base d'oxydes ou de niture de silicium ou d'oxydes métalliques est déposée en face avant. Elle sert aussi à passiver la surface en limitant les recombinaisons entre charges afin de conserver la conductivité du matériau. Dépôt chimique en phase gazeuse via un plasma (PECVD) d'une couche de Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> à partir de silane SiH<sub>4</sub> et d'ammoniac NH<sub>3</sub>

- **Champ face arrière :**



La face arrière est dopée p+ par diffusion d'aluminium. Cette couche joue aussi un rôle de conducteur ohmique avec l'électrode arrière. Diffusion thermique d'aluminium Al à 850°C à partir d'une pâte d'aluminium déposée sur toute la face arrière

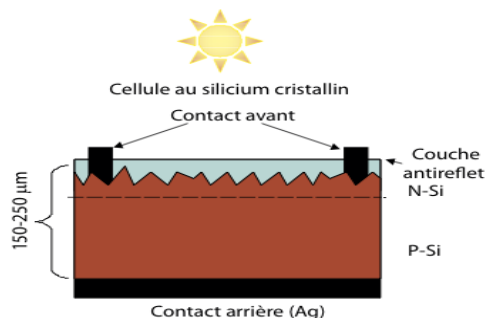
- **Métallisation :**



Les contacts électriques sont des métaux déposés en face avant (électrode -) et en face arrière (électrode +) o Sérigraphie d'argent en face avant et d'aluminium en face arrière par frittage de pâtes métalliques

- **Test et tri :**

Les cellules sont mesurées électriquement puis triées selon leur caractéristique afin d'optimiser leur association ultérieure.



**Figure II.5 : Cellule au silicium cristallin**

Source : Découverte n°344-345 janvier-février 2007

## Etape 4 : assemblage des modules

La fonction des modules est de protéger les cellules du milieu extérieur et de faciliter leur mise en œuvre, tout en limitant le plus possible les pertes optiques et les baisses de rendement dues à l'échauffement des cellules en fonctionnement.

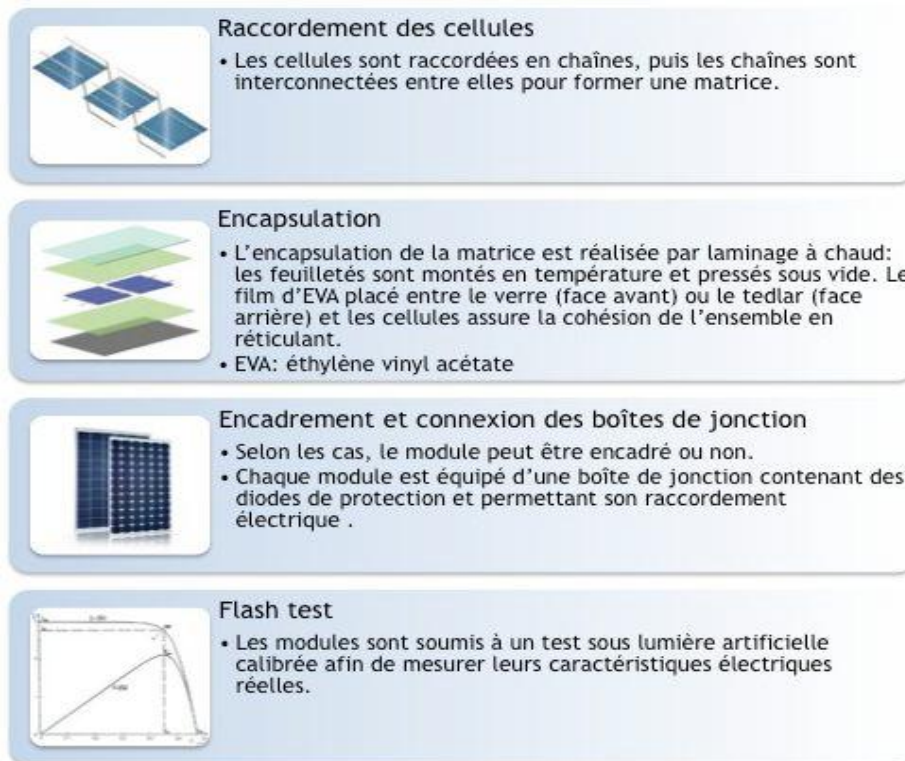


Figure II.6 : assemblage des modules [16]

## Etape 5 : groupement de plusieurs modules pour réaliser un système photovoltaïque

Le système intégré en toiture comprend également une structure porteuse, des composants électroniques et électriques.

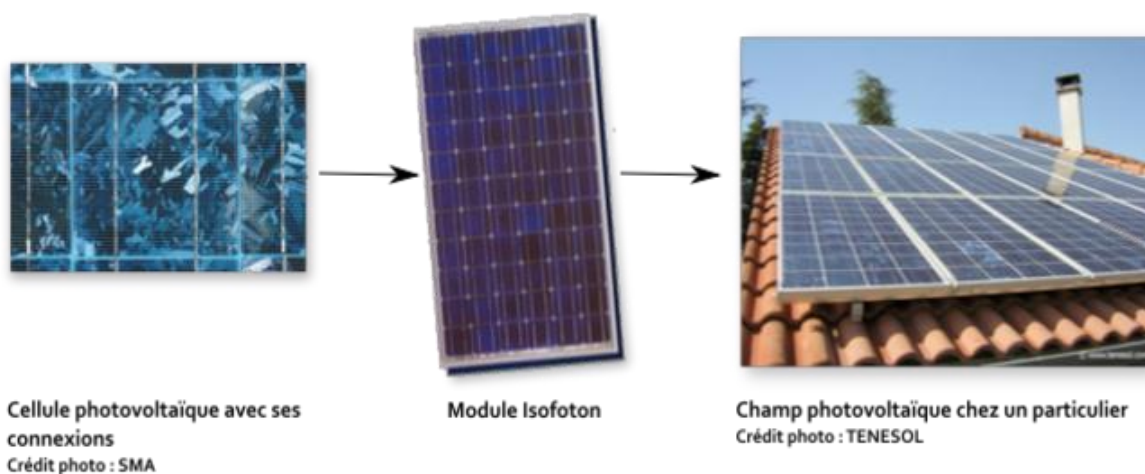


Figure II.6 : Groupement de plusieurs modules pour réaliser un système PV [16]

Les différentes étapes sont finalement celles-ci :

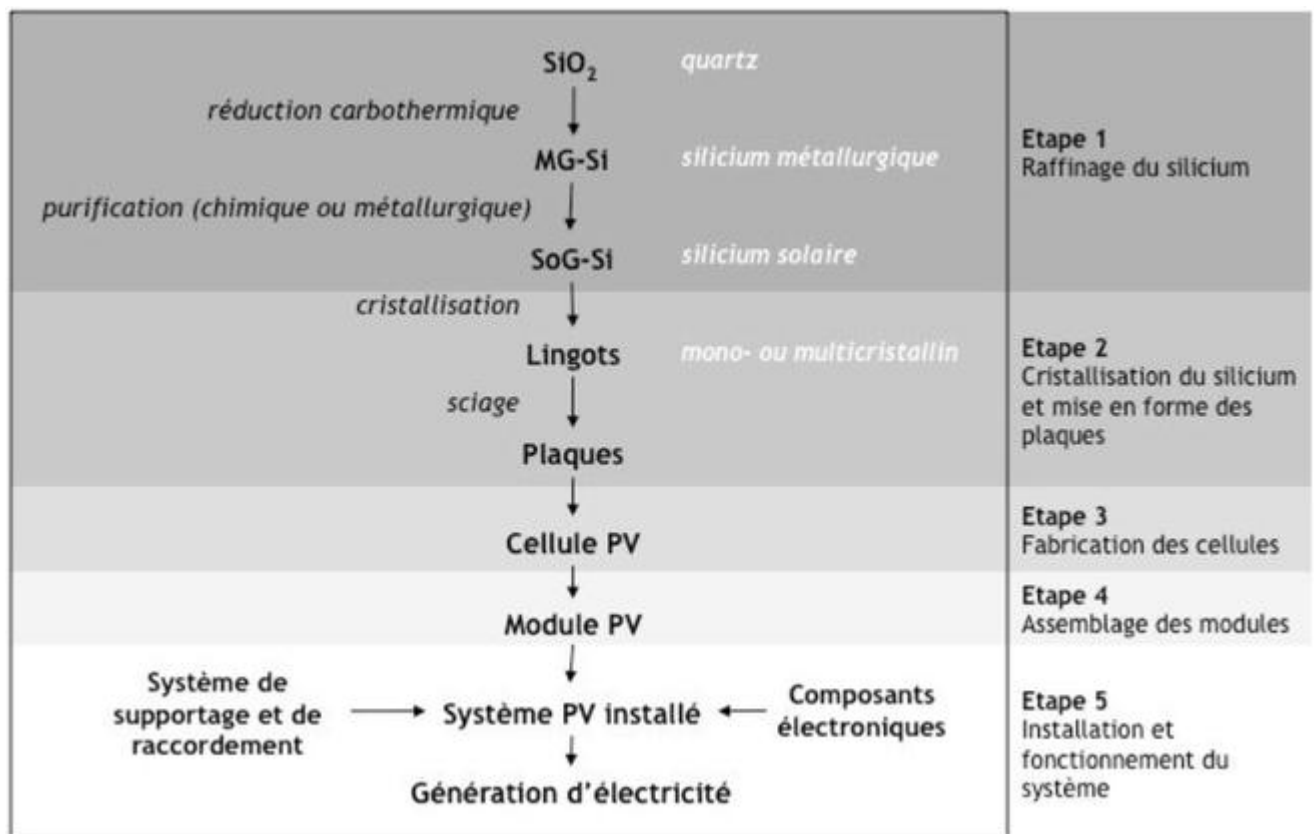


Figure II.8 : Étapes dans la fabrication d'un système photovoltaïque

### III. Les différents types de cellules photovoltaïques :

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique.

La production des cellules photovoltaïques nécessite de l'énergie, et on estime qu'une cellule photovoltaïque doit fonctionner environ 2 à 3 ans suivant sa technologie pour produire l'énergie qui a été nécessaire à sa fabrication. [20]

#### ➤ Principe de fonctionnement

Une cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau).

Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Le courant de sortie, et donc la puissance, sera proportionnelle à la surface du module.

Avantage :

Haute fiabilité, pas de pièce mobile

Entretien réduit, peu ou pas de coût de fonctionnement

Inconvénients :

Coût de fabrication élevé  
Fonctionnement par intermittence, dépend de l'ensoleillement  
Rendement faible

### ➤ Les principaux types de cellules photovoltaïques

#### 1- Cellule en silicium monocristallin



Figure II 9 [20]

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme.

#### *Avantage :*

Très bon rendement (environ  $150 \text{ Wc/m}^2$ )  
Durée de vie importante (+/- 30 ans)

#### *Inconvénients :*

Coût élevé  
Rendement faible sous un faible éclaircissement  
Rendement module commercial : 12 à 20%  
Rendement record en laboratoire : environ 25%  
Coût élevé

#### 2- Cellule en silicium poly cristallin



Figure II.10 [20]

Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. Ce genre de cellule est également bleu, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.

*Avantage :*

- Bon rendement (environ 100 Wc/m<sup>2</sup>)
- Durée de vie importante (+/- 30 ans)
- Meilleur marché que le monocristallin

*Inconvénients :*

- Rendement faible sous un faible éclairement.
- Rendement module commercial : 11 à 15%
- Rendement record en laboratoire : environ 20%

Ce type de cellules ont pour l'instant le meilleur rapport qualité / prix

### 3- CELLULE SILICIUM AMORPHE EN COUCHE MINCE

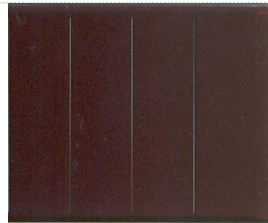


Figure II.11 [20]

*cellule photovoltaïque amorphe*

Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est gris très foncé ou marron. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites "solaires".

*Avantage :*

- Fonctionnent avec un éclairement faible
- Bon marché par rapport aux autres types de cellules
- Moins sensible aux températures élevées

*Inconvénients :*

- Rendement faible en plein soleil (environ 60 Wc/m<sup>2</sup>), les cellules en couche mince nécessite une surface plus importante pour atteindre les mêmes rendements que les cellules épaisses
- Durée de vie courte (+/- 10 ans), performances qui diminuent sensiblement avec le temps
- Rendement module commercial : 5 à 9%
- Rendement record en laboratoire : environ 13,4%

#### 4- CELLULE SANS SILICIUM EN COUCHE MINCE CIS

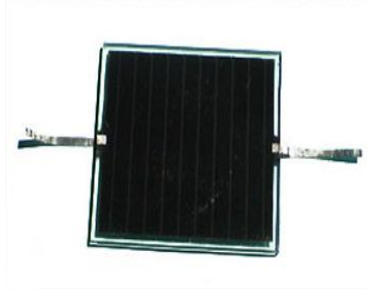


Figure II.12 : [20]

Cellule photovoltaïque de type  
cuivre - indium - sélénium (CIS)  
crédit : Solar World

Les cellules CIS représentent la nouvelle génération de cellules solaires sous forme de films minces, de type cuivre-indium-sélénium (CIS). Les matières premières nécessaires à la fabrication des cellules CIS sont plus faciles à se procurer que le silicium utilisé dans les cellules photovoltaïques classiques. De plus, leur efficacité de conversion énergétique est la plus élevée à ce jour pour des cellules photovoltaïques en couche mince.

##### Avantage :

- Permet d'obtenir les meilleurs rendements par rapport aux autres cellules photovoltaïques en couche mince
- Permet de s'affranchir du silicium
- Les matériaux utilisés ne causent pas de problème de toxicité
- La cellule peut être construite sur un substrat flexible

##### Inconvénients :

Les cellules en couche mince nécessitent une surface plus importante pour atteindre les mêmes rendements que les cellules épaisses

Rendement module commercial	:	9	à	11%
Rendement record en laboratoire : environ 19,3%				

#### 5- Cellule Tandem :

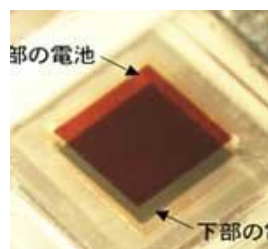


Figure II.13 : [21]

Empilement monolithique de deux cellules simples. En combinant deux cellules (couche mince de silicium amorphe sur silicium cristallin) absorbant dans des domaines spectraux se chevauchant, on améliore le rendement théorique par rapport à des cellules simples distinctes, qu'elles soient amorphes, cristallines ou microcristallines.

- avantage :
  - sensibilité élevée sur une large plage de longueur d'onde. Excellent rendement.
- inconvénient :
  - coût élevé dû à la superposition de deux cellules.



## 6- CELLULE MULTIJONCTION

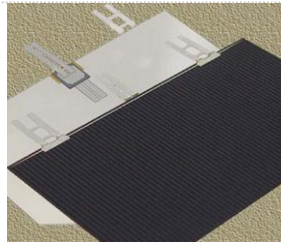


Figure II.14 : Cellule photovoltaïque multi jonction [20]

Les cellules multi-jonction sont composées de différentes couches qui permettent de convertir différentes parties du spectre solaire et ainsi d'obtenir les meilleurs rendements de conversion.

*Avantage :*

Rendement inégalé

*Inconvénients :*

Pas d'application commerciale

Rendement record en laboratoire : environ 40% (sous une concentration de 240 soleils)

Développé pour les applications spatiales, ce type de cellule n'est pas encore commercialisable

Pour améliorer les rendements des cellules, la recherche se tourne actuellement vers plusieurs pistes dont notamment :

- 7- **Cellules multicouches** : superposition de multiples cellules aux propriétés différentes (utilisant des bandes d'énergie différentes permettant un balayage plus large du spectre solaire). Ce type de cellules est déjà commercialisé, mais principalement pour des applications spatiales. Les rendements obtenus sous concentration sont très prometteurs (de l'ordre de 30 %).

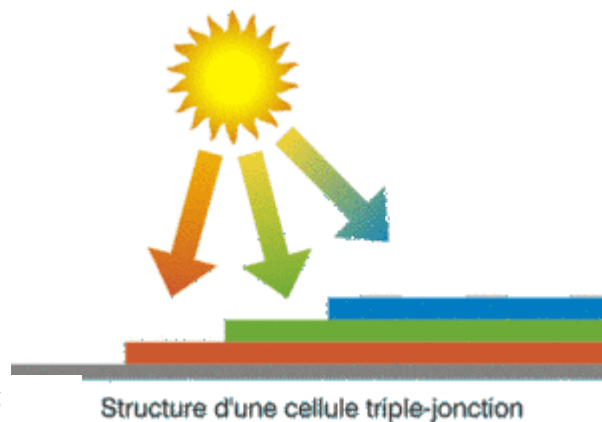


Figure II.15

Structure d'une cellule triple-jonction



## 8- CELLULE A CONTACTE INTERDIGITES



Figure I.16 : Schéma de la cellule inter digitée (gauche), Image de la face arrière (structure inter digitée) et de la face avant de la cellule réalisée (droite). [22]

Les cellules inter digités en face arrière ont potentiel évident pour atteindre les hauts rendements .en effet dans ces structures les zones d'émetteur est de BSF sont localisées en face arrière de la cellule. [23]

Comme le décrit la figure dans la structure, la jonction p-n les métallisations sont localises en face arrière sous forme de peignes inter digités. La structure implique donne certaine contraintes.

- La nécessite de travailler avec des substrats de bonne qualités [Granek09][Diouf10]
- la passivation de la face avant doit être excellente afin de limiter les recombinaisons en surface
- la résistivité du substrat et la géométrie de la face arrière

### ➤ Perspectives :

Les perspectives ouvertes par la conversion photovoltaïque sont très variées. Les recherches portent sur l'amélioration des technologies déjà commercialisées mais également sur le développement des nouvelles technologies comme les cellules à concentration ou les cellules organiques :

– **La concentration** consiste à placer des cellules photovoltaïques au sein d'un foyer optique qui concentre la lumière. Leur rendement est élevé (de 20 à 30%) mais elles doivent être placées sur un support mobile afin d'être constamment positionnées face au soleil. Cette perspective est réservée pour les centrales photovoltaïques au sol situées dans des régions bien ensoleillées.

– **Les cellules organiques** sont composées de semi-conducteurs organiques déposés sur un substrat de plastique ou de verre. Ces cellules offrent un rendement moyennement élevé (5 à 10%) mais présentent des perspectives intéressantes de réduction de coûts. [24]

#### IV. Recherche et développement :

La technique n'a pas atteint la maturité et de nombreuses pistes de recherches sont explorées ; il s'agit d'abord de faire baisser le prix de revient de l'électricité produite, mais aussi d'obtenir des progrès en matière de rusticité, de souplesse d'usage, de facilité d'intégration dans des objets, de durée de vie, etc.). Toutes les étapes des procédés de fabrication peuvent être améliorées, par exemple :

- la société « Evergreen Solar » a éliminé l'étape du sciage, remplacée par le dépôt de silicium encore liquide sur un film où il se cristallise directement à l'épaisseur du "wafer"
- la société « NanoSolar » industrialise la production de cellules CGIS par une technique d'imprimerie, en continu, en espérant des coûts de 1 \$/W en 2010.
- toutes les sociétés annoncent successivement des accroissements du rendement de leurs cellules
- la taille des wafers croît régulièrement, ce qui diminue le nombre de manipulations
- On cherche à mieux valoriser toutes les longueurs d'onde du spectre solaire (dont l'infrarouge, ce qui ouvrirait des perspectives très intéressantes : transformation directe de la lumière d'une flamme en électricité, rafraîchissement).
- Des « *concentrateurs* » (déjà utilisés sur les satellites) sont testés sur terre. Via des miroirs et des lentilles incorporées dans le panneau, ils focalisent le rayonnement sur l'élément essentiel et coûteux qui est la cellule photovoltaïque et ses semi-conducteurs. Fin 2007, Sharp a annoncé disposer d'un système concentrant jusqu'à 1100 fois le rayonnement solaire (contre 700 fois pour le précédent record en 2005); début 2008, Sunrgi a atteint 1600 fois. La concentration permet de diminuer la proportion du panneau consacré à la production de l'électricité, et donc leur coût. De plus ces nouveaux matériaux (les III-V notamment) supportent très bien l'échauffement important dû à la concentration du flux solaire.
- On étudie aussi la possibilité d'associer les siliciums amorphe et cristallin par « *hétérojonction* », dans une même cellule photovoltaïque à plus de 20 % de rendement. Projet de 2 ans annoncé début 2008, associant le *Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et des nanomatériaux* du CEA-Liten et la société coréenne *JUSUNG* (fournisseur d'équipements pour les fabricants de semi-conducteurs), avec l'INES (Savoie) où le CEA-Liten a concentré ses activités concernant l'énergie solaire.
- D'autres semi-conducteurs (sélénium; association *Cuivre-Indium-Sélénium* (CIS) en couche mince) sont étudiés par exemple en France par l'institut de recherche et développement sur l'énergie photovoltaïque (IRDEP <sup>[8]</sup>). Le CIS semble pouvoir offrir un rendement modeste de 12%, mais à faible coût de fabrication.
- Des composés organiques (matières plastiques) peuvent également être utilisés pour réaliser des cellules polymères photovoltaïques et pourraient permettre de réaliser des panneaux souples et légers, des tuiles, voiles ou tissus photovoltaïques, espère-t-on à faible coût de fabrication. Pour l'instant leurs rendements sont faibles (5% maximum), ainsi peut-être que leur durée de vie, et de nombreux problèmes techniques restent à résoudre. Début 2008, le groupe japonais *Fujikura* a annoncé avoir testé (1000 heures à 85 °C et une hygrométrie de 85%) une cellule photovoltaïque organique de type Grätzel non seulement plus résistante, mais au rendement amélioré de 50 à 70 % grâce à une surface dépolie qui diffuse aléatoirement la lumière réfléchie à l'intérieur de la

cellule où elle libère à nouveau des charges électriques en activant d'autres pigments photosensibles.

- Une équipe Américaine du Boston collège à Chestnut Hill (Massachusetts) a mis au point des panneaux solaires capables de récupérer les infrarouges et de les transformer en électricité. Ce qui permettrait une production d'énergie électrique à partir de n'importe quelle source de chaleur, même la nuit : Pour l'instant, seule une partie de la lumière visible, principalement les rayonnements verts et les bleus, est transformée en électricité et le rayonnement infrarouge n'est utilisé que par les panneaux thermiques pour chauffer de l'eau. La transformation des infrarouges en électricité constituera une véritable percée.

La pénurie de silicium accroît encore l'incitation à l'innovation sur un marché en forte croissance qui s'annonce colossal, surtout si on parvient à baisser le prix de revient de l'électricité produite et à le rapprocher de celui des combustibles fossiles

## V. Future :

L'industrie du photovoltaïque se tourne aujourd'hui vers le développement de techniques qui utiliseront à terme beaucoup moins de matière ou des matériaux moins onéreux. Le solaire à concentration, le dépôt sur ruban, les panneaux à couche fine et les matériaux organiques constituent aujourd'hui les principaux axes de recherche et d'innovation future.

Enfin, la recherche sur le stockage d'électricité sera également importante. Ce thème transversal de l'énergie concerne plus particulièrement le solaire photovoltaïque puisque le caractère compétitif de cette technologie dépendra beaucoup de la capacité à adapter sa production pour répondre aux besoins ponctuels

## **CHAPITRE III**

---

# **DIMENSIONNEMENT D'UN SYSTEME AUTONOME**

### III.1 Introduction :

Dans le cadre de notre étude pour déterminer et simuler le dimensionnement d'un foyer isolé dans la région de Tlemcen, nous allons procéder en deux temps, en premier lieu nous allons réaliser les différents calculs manuellement, ensuite nous allons utiliser un logiciel spécifique dédié à l'utilisation photovoltaïque à savoir PV Sol ; ainsi, nous pourrons comparer les résultats.

### III.2 Dimensionnement :

Nous devons de ce fait suivre plusieurs étapes afin d'optimiser notre installation à commencer par le positionnement de nos panneaux, calcul du bilan de puissance, calcul de la puissance crête, de la capacité de stockage (batteries) ainsi que le choix des différents composants du système (régulateur de charge et onduleur)

#### 1- Positionnement des panneaux :

On adoptera les inclinaisons suivantes en fonction de la latitude du lieu :

Latitude	Inclinaison
Petites ( $\leq 20$ degrés)	10 degrés
Moyennes (de 20 à 35 degrés)	Latitude
Moyennes ( $\geq 35$ degrés)	Latitude+10 degrés

Pour ce qui est de notre exemple, la latitude est  $35^\circ$  ; ainsi on pourra placer nos panneaux orientés Nord-Sud sur une surface dégagée avec un angle d'inclinaison de  $30^\circ$  ou  $35^\circ$ .

#### 2- Calcul du bilan de puissance :

Le calcul du bilan de puissance consiste à calculer les besoins énergétiques du foyer, De ce fait, on doit prendre en compte pour chaque appareil :

- la puissance instantanée
- le nombre d'heures d'utilisation par jour

Pour notre exemple, nous avons choisi un foyer avec les équipements suivants :

Appareil	Nombre	Puissance (Watts)	Utilisation/Jour (Heure)	Energie Consommée Wh/jour	Energie Consommée (KWh/année)
Lampe pour pièce claire	02	60	2H	240	20.2
Lampe pour pièce claire	01	60	8H	480	75.1
Lampe pour pièce claire	01	60	10H	600	91.6
Sèche-cheveux	01	1500	10 Minutes /utilisation	250	182.5
Réfrigérateur - Congélateur	01	160	24H	3800	1401.6
Lave-linge 40 degré	01	1200	1H	1200	438
Appareil TV	01	80	6H	480	175.2
Ordinateur	01	150	7H	1050	383.2

L'énergie consommée par jour est : 8100 Wh/Jour

L'énergie consommée annuellement est 2767 KWh

➤ *1ere Méthode : Calcul Manuel*

• **Détermination de la puissance crête :**

La puissance crête est le rapport entre l'énergie nécessaire pour le fonctionnement de notre système et l'énergie effective reçue, on peut la définir par la formule suivante :

$$P_{\text{crête}} = E_j / [H_{\text{min}} \cdot h_{\text{batt}} \cdot h_{\text{ond}} \cdot h_{\text{elec}}]$$

Ou :

**E<sub>j</sub>** : besoins journaliers en électricité (en Wh/j)

**H<sub>min</sub>**: l'irradiation journalière Minimum (en Wh/j/m<sup>2</sup>)

**h<sub>batt</sub>**: rendement énergétique des batteries

**h<sub>ond</sub>** : rendement énergétique de l'onduleur

**h<sub>elec</sub>**: rendement énergétique des autres composants électroniques : 90%

Pour notre exemple :

E<sub>j</sub>= 8100 Wh/jour

L'irradiation journalière dans la région de Tlemcen en décembre est : 4KWh/m<sup>2</sup>/jour

H<sub>batt</sub>=0.7 et h<sub>ond</sub>=0.8

$$\text{De ce fait, } P_{\text{crête}} = 8100 / 4 * 0.7 * 0.8 * 0.9 = 4 \text{KWc}$$

Donc, si on choisi d'utiliser des panneaux JS 250 Mono fabriqués par l'entreprise chinoise AE Solar, on aura besoin de 18 panneaux (chacun développant 250Wc)

- **Détermination de la capacité de stockage (batteries) :**

On détermine une durée d'autonomie des batteries en nombre de jours afin d'alimenter le système sans l'aide des modules photovoltaïques.

On fixe un degré de décharge des batteries à ne pas dépasser. (En général 80%)

$$C_{batt}(A.h) = E_j \cdot \text{Nombre de jours d'autonomie} / [(\text{tension}(V) \cdot \text{Degré de décharge batt}(\%) \cdot \text{hond})]$$

Ou :

**E<sub>j</sub>** : besoins journaliers en électricité (en Wh/j)

**hond** : rendement énergétique de l'onduleur

Si on choisi pour notre exemple 2 jours d'autonomie et des batteries dégageant 24V, on aura donc :

$$C_{batt}(A.h) = 8100 \cdot 2 / 24 \cdot 0.8 \cdot 0.8, \text{ donc: } C_{batt} = 1054 \text{ AH}$$

➤ **2eme Méthode: Dimensionnement en utilisant le logiciel PV Sol**

Le logiciel PV Sol est un logiciel spécifique pour les installations photovoltaïques, il dispose d'une base de données géographiques et climatiques ainsi qu'une large gamme de produits fabriqués par plusieurs constructeurs.

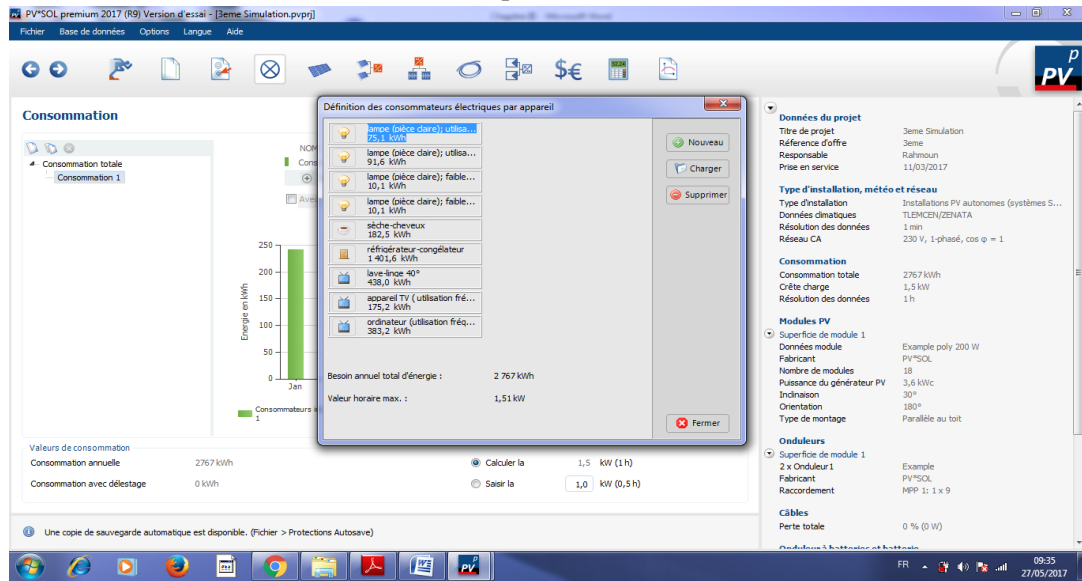
Pour notre exemple, nous avons choisi le lieu « Tlemcen Zenata », il nous donne directement la longitude, la latitude ainsi que l'irradiation annuelle.

Nous devons aussi choisir le type de raccordement, pour notre installation, nous allons choisir « installation PV autonome, système SMA »

The screenshot displays the PV\*SOL software interface with the following configuration details:

- Type d'installation:** Installations PV autonomes (systèmes SMA)
- Données climatiques:**
  - Pays: Algérie, Site: TLEMCEN/ZENATA
  - Latitude: 35° 0' 35", Longitude: -1° 27' 35"
  - Ensoleillement total annuel: 1935 kWh/m²
  - Température moyenne annuelle: 17,8 °C
  - Fuseau horaire: UTC+1, Période: 2000 - 2009
- Réseau CA:**
  - Tension (N+L): 230 V
  - Nombre de phases: 1-phasé
  - cos φ: 1
- Données du projet:**
  - Titre de projet: 3eme Simulation
  - Référence d'offre: 3eme
  - Responsable: Rahmoun
  - Prise en service: 11/03/2017
- Type d'installation, météo et réseau:**
  - Type d'installation: Installations PV autonomes (systèmes S...
  - Données climatiques: TLEMCEN/ZENATA
  - Résolution des données: 1 min
  - Réseau CA: 230 V, 1-phasé, cos φ = 1
- Consommation:**
  - Consommation totale: 2767 kWh
  - Crête charge: 1,5 kW
  - Résolution des données: 1 h
- Modules PV:**
  - Superficie de module 1: Exemple poly 200 W
  - Données module: PV\*SOL
  - Fabricant: PV\*SOL
  - Nombre de modules: 18
  - Puissance du générateur PV: 3,6 kWc
  - Inclinaison: 30°
  - Orientation: 180°
  - Type de montage: Parallèle au toit
- Onduleurs:**
  - Superficie de module 1: Exemple
  - 2 x Onduleur1: PV\*SOL
  - Fabricant: MPP 1: 1 x 9
  - Raccordement: MPP 1: 1 x 9
- Câbles:**
  - Perte totale: 0 % (0 W)

- **Profil de Consommation** : Ensuite nous devons définir un profil de charge conformément à notre tableau du bilan de puissance



Le profil de consommation pour chaque mois est le suivant :

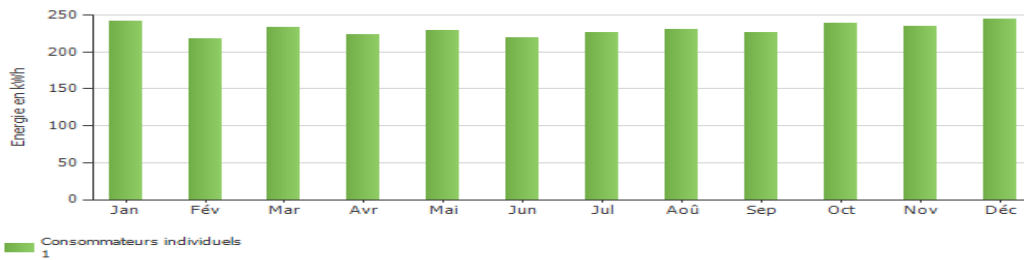
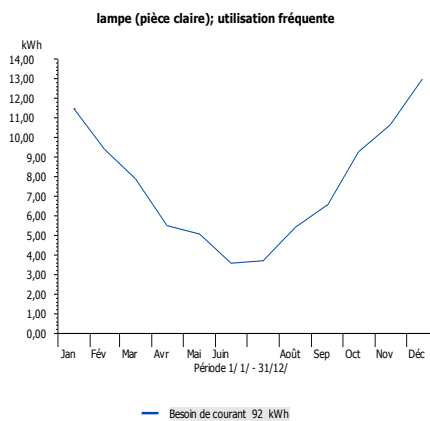
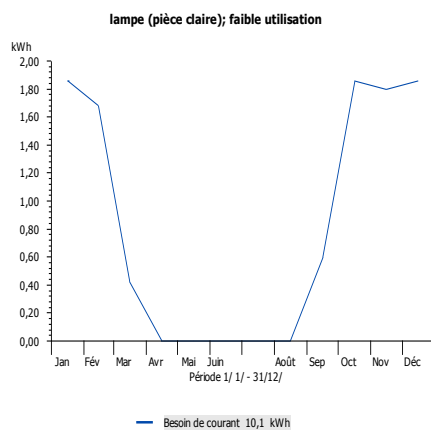
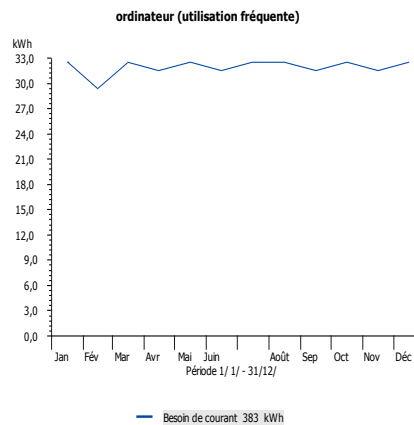
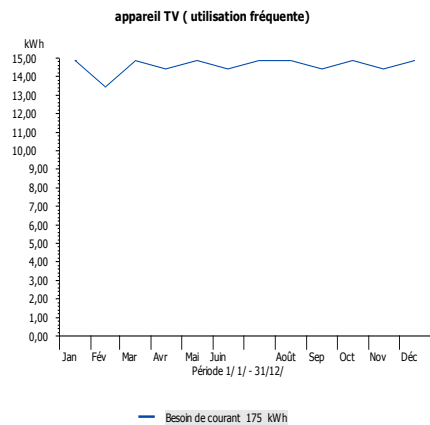
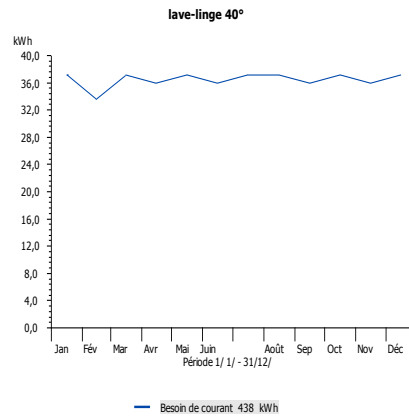
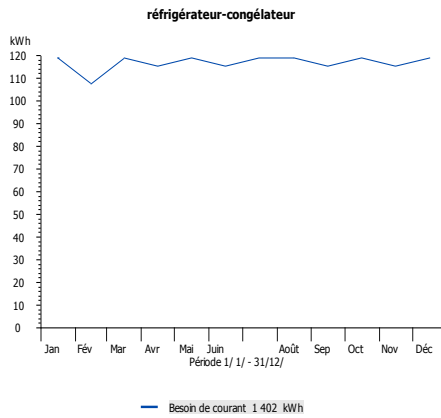
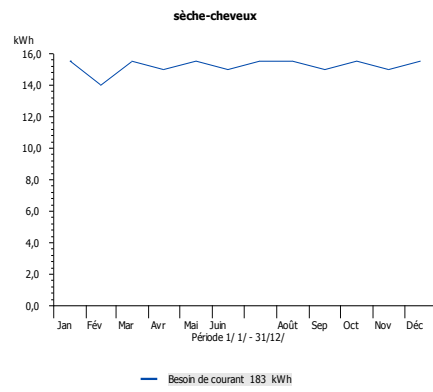
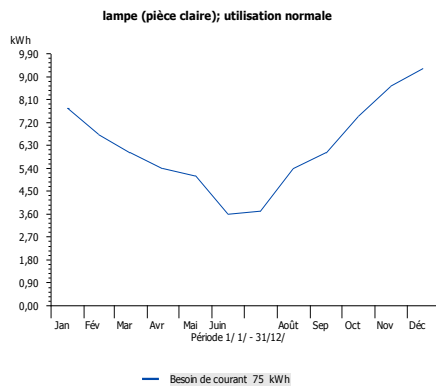


Figure III.1

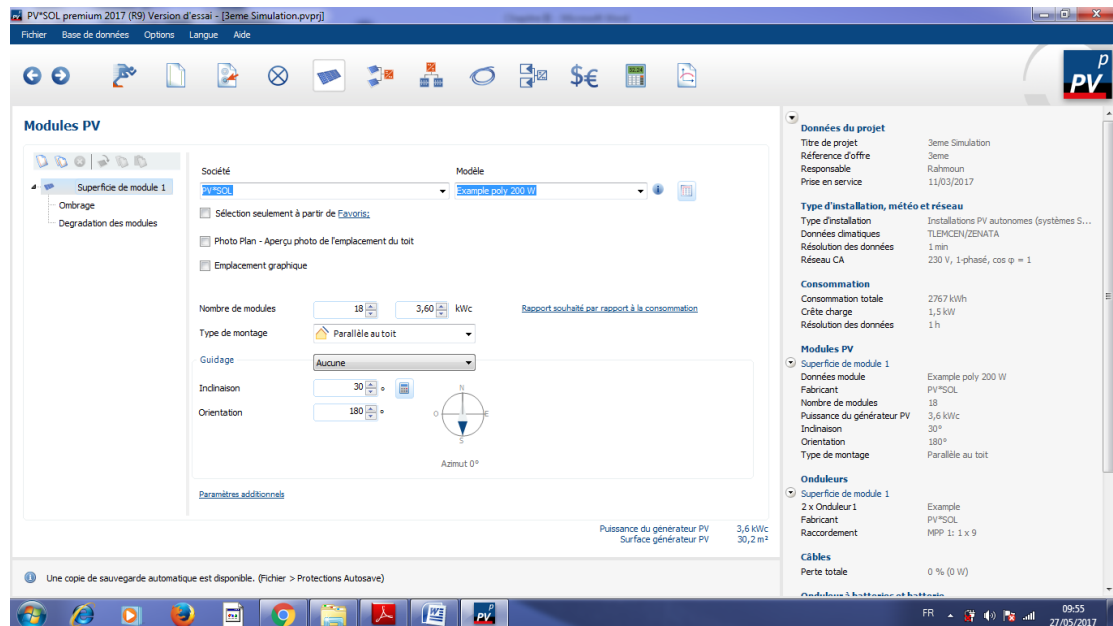
Tandis que le profil de consommation de chaque appareil étalé sur une durée d'une année est représenté sur les figures suivantes :





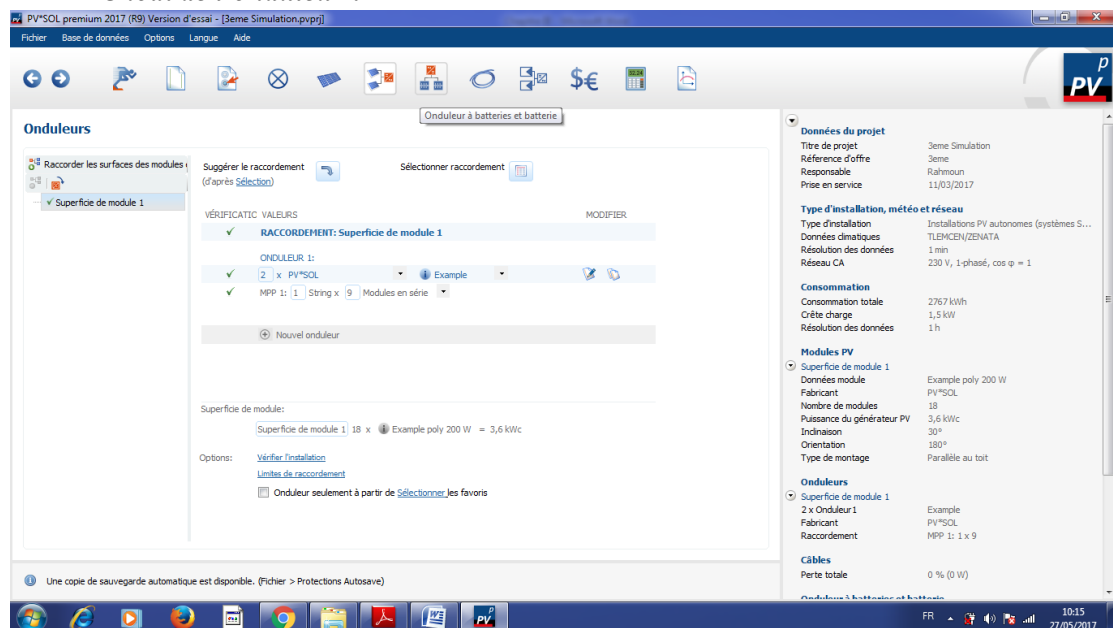


### - *Emplacement des modules :*



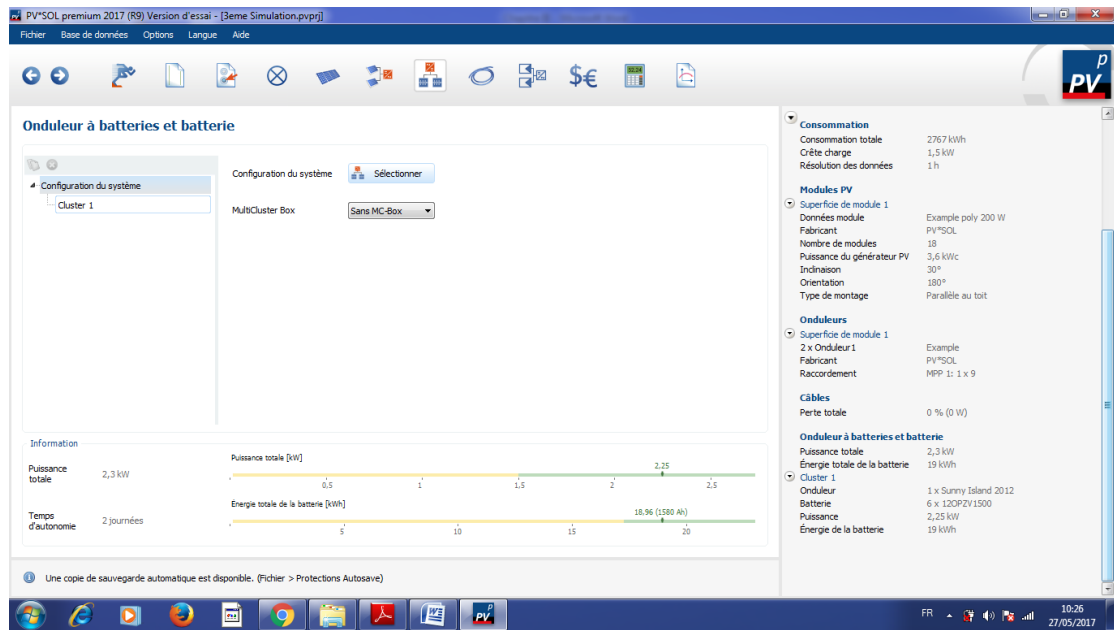
Nous choisissons des panneaux poly cristallin de 200W, le logiciel nous propose 18 panneaux orientés Nord-Sud avec une inclinaison de 30 Degrés occupant une surface de 30.2 m2 et développant 3.6 Wc

### - *Choix de l'onduleur :*



Le logiciel nous propose 2 onduleurs PV Sol, néanmoins, nous pouvons modifier ce choix et opter pour d'autres constructeurs.

**Batteries:**



Le logiciel nous propose 6 batteries 12OPZV1500 et un onduleur à batteries Sunny Island 2012. Ce dispositif peut développer une puissance de 2.3 kw, les batteries peuvent développer 19 kwh

**- Résultats :**

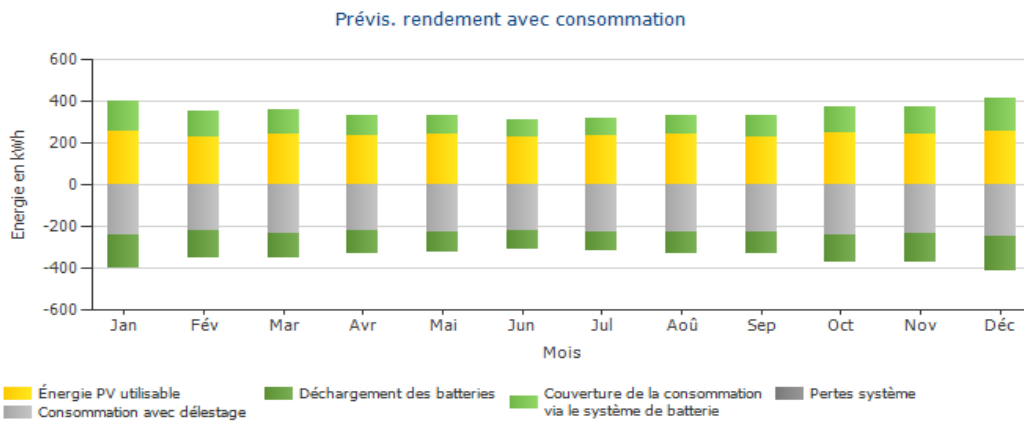


Figure III.2

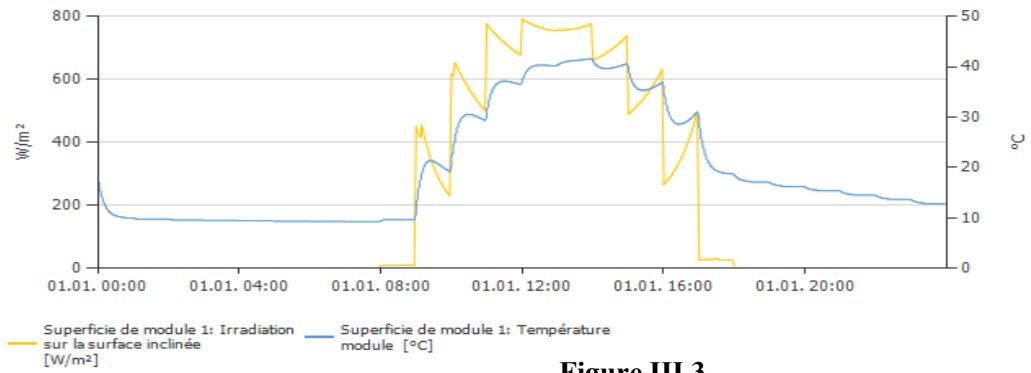


Figure III.3

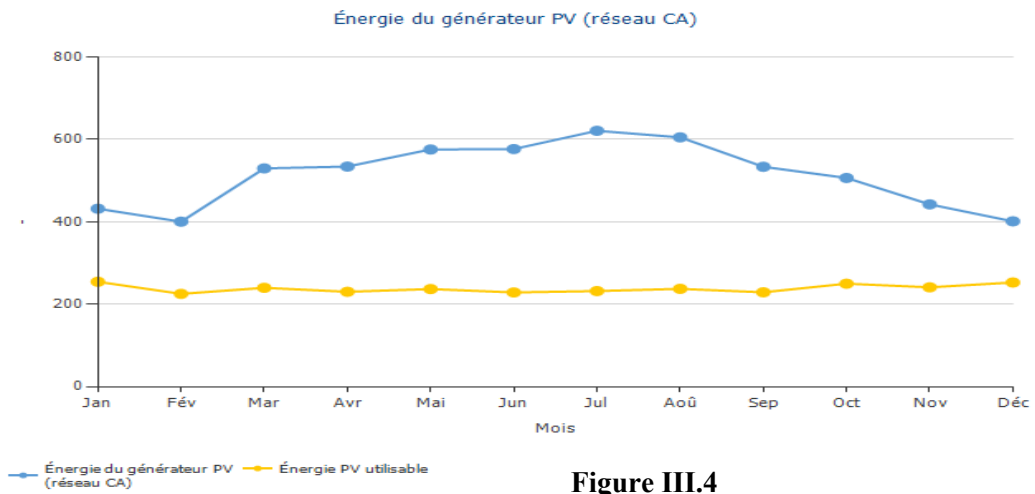


Figure III.4

Nous remarquons que cette installation peut fonctionner sur une longue période (20ans) avec un rendement systeme de 24.6% et un coefficient de performance de 78.7%

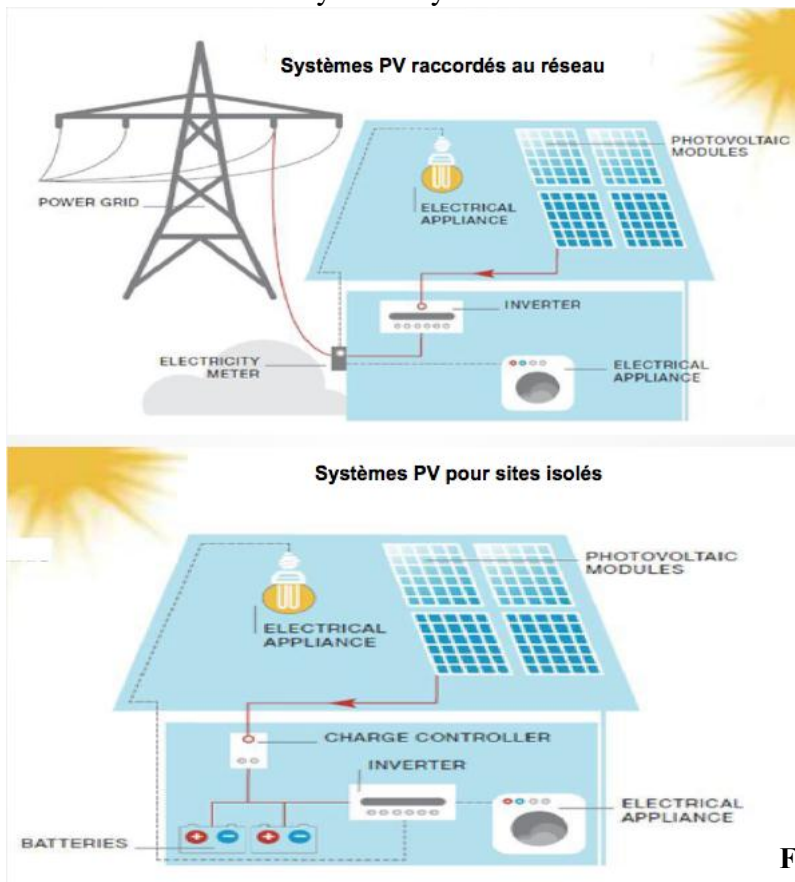
## **CHAPITRE III**

---

# **DIMENSIONNEMENT D'UNE INSTALLATION HYBRIDE RACCORDEE AU RESEAU**

**IV.1 Définition :**

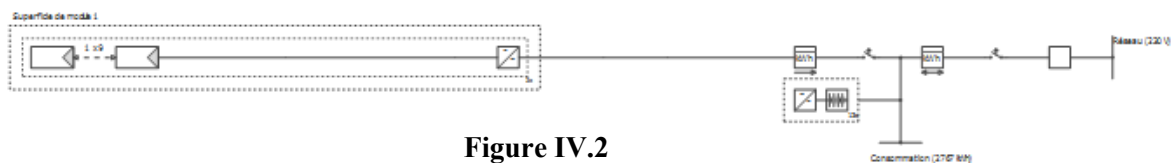
Le problème avec la puissance variable et non garantie produite par les sources renouvelables, peut être résolu par un couplage des sources d'approvisionnement et la formation d'un système dit hybride (SH). Un système hybride a sources d'énergie renouvelables (SHSER) est un système électrique, comprenant plus d'une source d'énergie, parmi lesquelles une au moins est renouvelable. Le système hybride peut comprendre un dispositif de stockage. D'un point de vue plus global, le système énergétique d'un pays peut être considéré comme un système hybride.



**Figure IV.1**

Pour ce chapitre, nous allons reprendre le même exemple en réalisant la simulation avec un système raccordé au réseau.

**IV.2 Dimensionnement :**



**Figure IV.2**

Nous remarquons sur le schéma que notre système est raccordé au réseau de distribution via un compteur double sens.

Cependant, il est important de souligner que la législation algérienne actuelle ne permet pas de vendre de l'énergie électrique pour un particulier directement sur le réseau basse tension de distribution publique.

Le dernier décret exécutif n° 17-98 du 29 Joumada El Oula 1438 correspondant au 26 février 2017 qui définit la procédure d'appel d'offres pour la production des énergies renouvelables et leur intégration dans le système national d'approvisionnement en énergie électrique ne porte que sur les investisseurs qui veulent produire et vendre au moins 1MW.

Pour ce qui est de notre étude, nous allons continuer notre exemple avec un compteur double sens afin de simuler la consommation dans les deux sens et essayer de dégager ainsi - en utilisant des tarifs européens - les profils d'investissement et de retour sur investissement sur une période de 20 ans ; d'ici là, peut être que la législation algérienne aurait changée.

#### IV.2.1 Profil de consommation :

Nous allons conserver le même exemple avec de légères modifications. En premier lieu, aucun changement pour le profil de consommation.

La consommation annuelle est toujours 2767 KWh

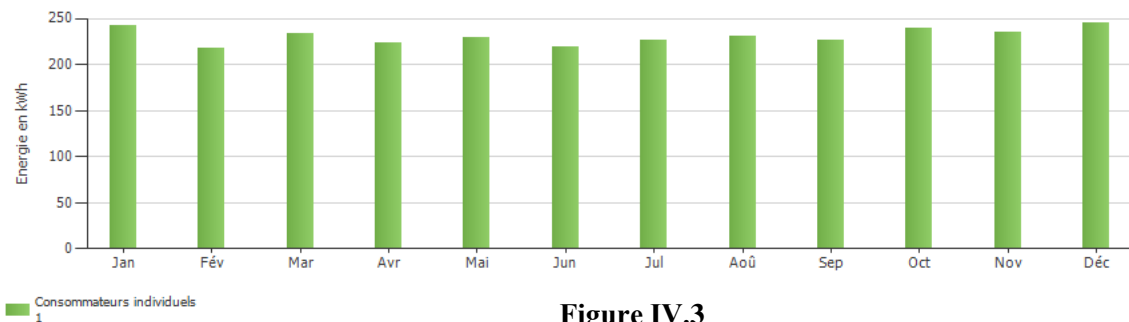
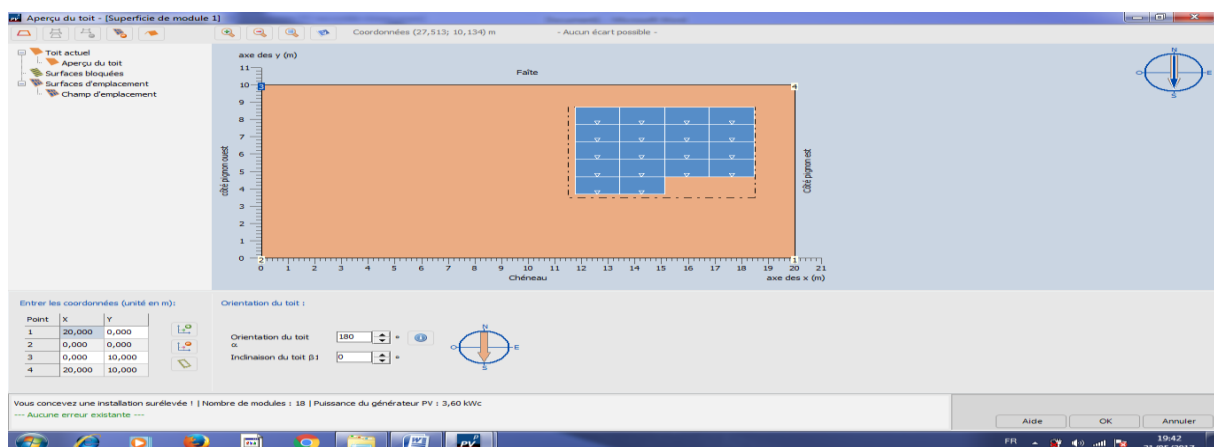


Figure IV.3

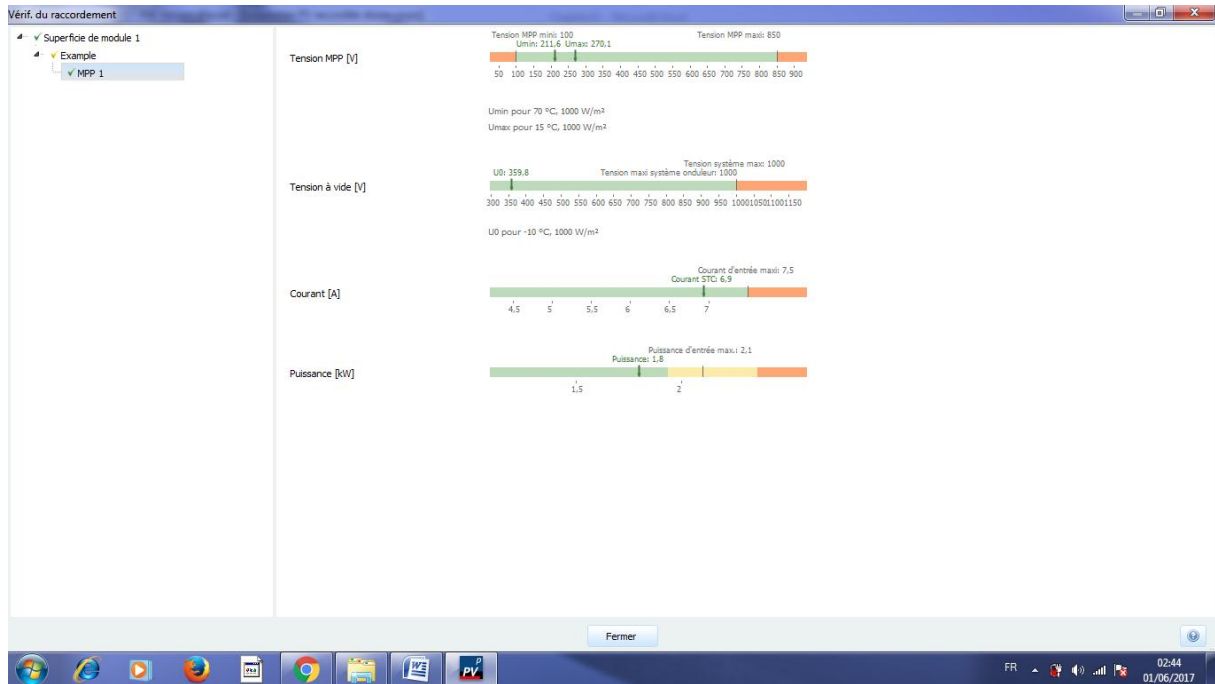
#### IV.2.2 Emplacement des modules :

Nous avons pour cette fois utilisé 18 modules Mono 200 W toujours orientés Nord /Sud avec une inclinaison de 30 degrés. Cette disposition permet d'étaler nos panneaux sur une superficie de 29.2m<sup>2</sup> soit presque 2m<sup>2</sup> de moins par rapport au module poly 200 W utilisées dans le chapitre précédent.



**IV.2.3 Onduleur :**

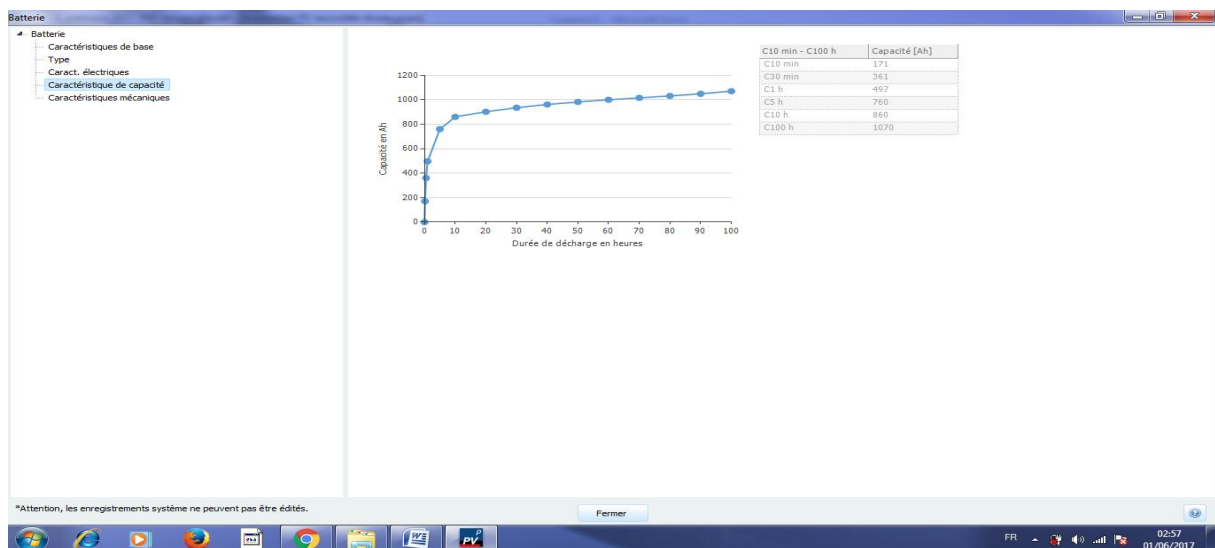
Le système nous propose 2 onduleurs avec chacun 9 modules montés en série, la plage de fonctionnement est donnée comme suit :



Nous remarquons que la tension ainsi que la puissance de fonctionnement est très largement insérée dans la plage de fonctionnement, de cette façon, notre système est à l'abri de fluctuations dues à de mauvaises conditions climatiques ou à d'éventuels ombrages des panneaux.

**IV.2.4 Batteries :**

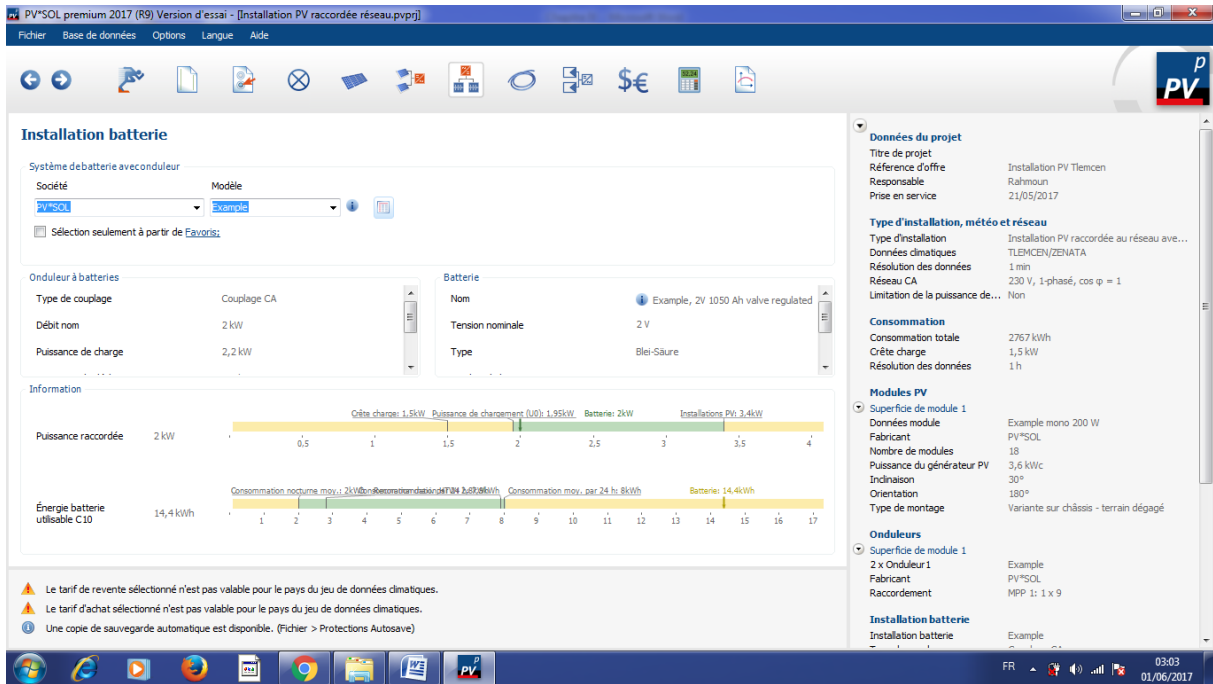
Le système nous propose 12 batteries de 2V de type Plomb/Acide pouvant fonctionner 3700 cycle de décharge à C10 et dont les caractéristiques sont exposées sur la figure suivante :



La capacité de stockage à C10 est 860Ah.

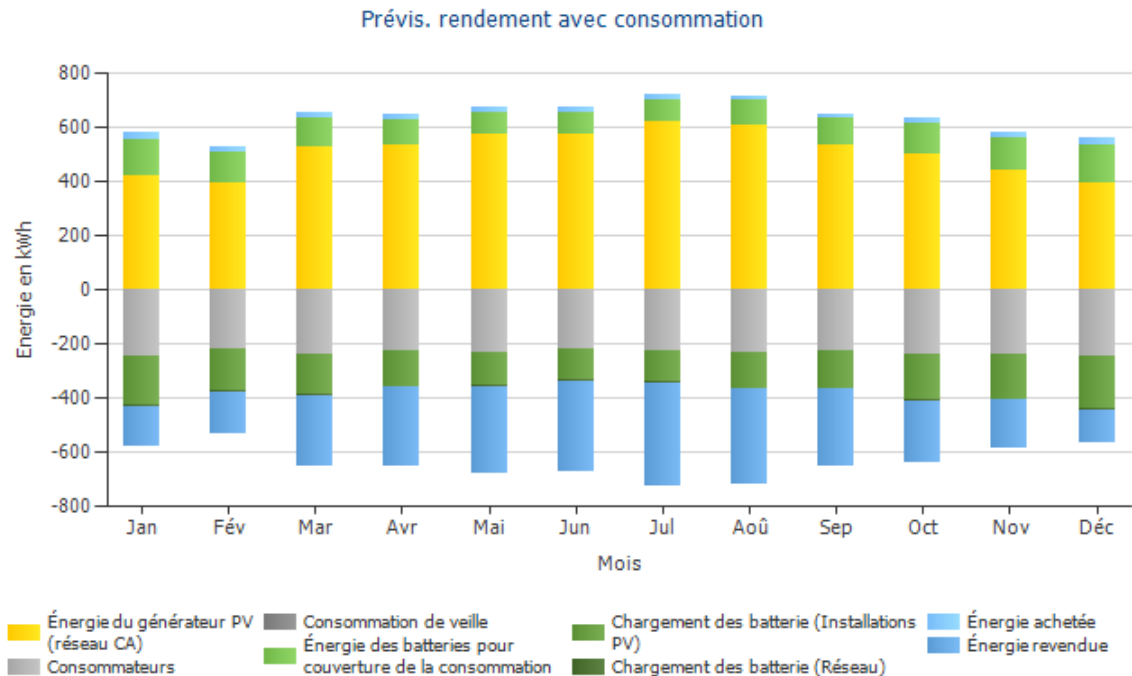


Nous remarquons aussi sur la figure suivante que la puissance délivrée par la batterie est au dessus de la plage de puissance de notre système :



Ceci nous assure un fonctionnement confortable de la batterie (décharge supérieur à 80%)

**IV.3 Résultats de la simulation :**



**Figure IV.4**

**Installations PV**

Puissance du générateur PV	3,6	kWc
Rendement annuel spéc.	1 709,11	kWh/kWc
Coefficient de performance de l'installation (PR)	79,9	%
Énergie du générateur PV (réseau CA)	6 153	kWh/année
Consommation propre direct	1 354	kWh/année
Énergie revendue	3 053	kWh/année
Régulation au point d'alimentation	0	kWh/année
Chargement de la batterie	1 747	kWh/année
Part de consommation propre	50,4	%
Emissions CO <sub>2</sub> évitées	3 515	kg / année

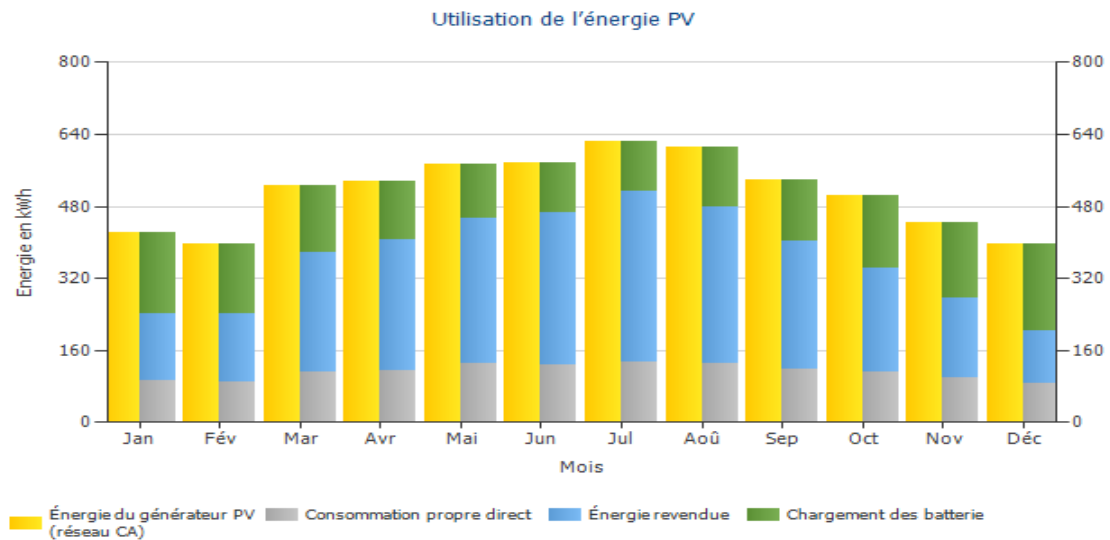
**Consommateurs**

Consommateurs	2 767	kWh/année
Consommation de veille	1	kWh/année
Consommation totale	2 768	kWh/année
couvert par l'installation PV	1 354	kWh/année
couvert par le réseau	231	kWh/année
couvert par la batterie net	1 183	kWh/année

**Installation batterie**

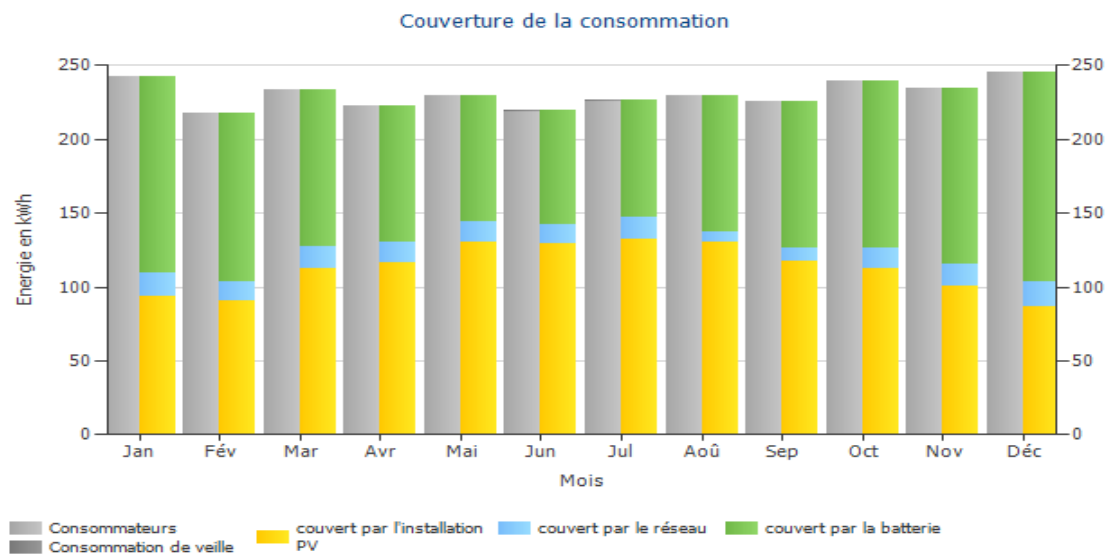
Charge initiale	14,4	kWh
Chargement de la batterie (Total)	1 818	kWh/année
Chargement de la batterie (Installations PV)	1 747	kWh/année
Chargement de la batterie (Réseau)	72	kWh/année
Énergie des batteries pour couverture de la consommation	1 255	kWh/année
Pertes dues au chargement/déchargement	294	kWh/année
Pertes en batterie	0	kWh/année
Charge cyclique	3,6	%
Durée de vie	>12	Années
Degré d'autosuffisance		
Consommation totale	2 768	kWh/année
Couvert par le réseau	231	kWh/année
Degré d'autosuffisance	91,6	%

**IV.3.1 Utilisation de l'Energie PV :**



**Figure IV.5**

**IV.3.2 Couverture de la consommation :**



**Figure IV.6**

**IV.3.4 Bilan Energétique de l'installation :**

Rayonnement global horizontal)	1 934,5	kWh/m <sup>2</sup>
Déviation du spectre standard	-19,34	kWh/m <sup>2</sup> -1,00 %
Réflexion du sol (albedo)	0,00	kWh/m <sup>2</sup> 0,00 %
Orientation et Inclinaison de la surface des modules	200,93	kWh/m <sup>2</sup> 10,49 %
Ombrage	0,00	kWh/m <sup>2</sup> 0,00 %
Réflexion à la surface supérieure du module	-85,63	kWh/m <sup>2</sup> -4,05 %

Rayonnement total sur le module	2 056,1	kWh/m <sup>2</sup>	
	2 056,1	kWh/m <sup>2</sup>	
	x 29,22	m <sup>2</sup>	
	= 60 089,2	kWh	
Rayonnement PV total	60 089,2	kWh	
Pollution	-600,89	kWh	-1,00 %
Conversion STC (efficacité nominale du module 12,31 %)	-52 165,06	kWh	-87,69 %
Énergie PV nominale	7 323,3	kWh	
Comportement en cas de faible luminosité	-145,22	kWh	-1,98 %
Différence par rapport à la température nominale du module	-425,50	kWh	-5,93 %
Diodes	-33,76	kWh	-0,50 %
Erreur de concordance (caractéristiques du fabricant)	-134,38	kWh	-2,00 %
Erreur de concordance (raccordement/ombrage)	0,00	kWh	0,00 %
Énergie PV (CC) sans réduction de l'onduleur	6 584,4	kWh	
Réduction due à la plage de tensions MPP	0,00	kWh	0,00 %
Réduction due au courant CC max.	-11,68	kWh	-0,18 %
Réduction due à la puissance CC max.	0,00	kWh	0,00 %
Réduction due à la puissance CA max./cos phi	-5,63	kWh	-0,09 %
Accordement MPP	-0,27	kWh	0,00 %
Énergie PV (CC)	6 566,8	kWh	
Énergie à l'entrée de l'onduleur	6 566,8	kWh	
Déviations de la tension d'entrée et la tension nominale	-26,20	kWh	-0,40 %
Conversion CC/CA	-387,73	kWh	-5,93 %
Consommation de veille	-0,58	kWh	-0,01 %
Pertes total de câblage	0,00	kWh	0,00 %
Énergie PV (CA) déduction faite de la consommation en veille	6 152,3	kWh	
Énergie du générateur PV (réseau CA)	6 152,8	kWh	

#### IV.3.5 Tableau du cashflow par année d'utilisation (Investissement/retour sur investissement) :

	<b>année 1</b>	<b>année 2</b>	<b>année 3</b>	<b>année 4</b>	<b>année 5</b>
Investissement	-5 400,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Rémunération revente	349,99 €	371,99 €	368,31 €	364,66 €	361,05 €
Economies d'énergie payante	556,89 €	562,40 €	567,97 €	573,60 €	579,27 €
Cashflow annuel	-4 493,12 €	934,39 €	936,28 €	938,26 €	940,33 €
Cashflow cumulé (trésorerie)	-4 493,12 €	-3 558,72 €	-2 622,44 €	-1 684,19 €	-743,86 €
	<b>année 6</b>	<b>année 7</b>	<b>année 8</b>	<b>année 9</b>	<b>année 10</b>
Investissement	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Rémunération revente	357,48 €	353,94 €	350,43 €	346,96 €	343,53 €
Economies d'énergie payante	585,01 €	590,80 €	596,65 €	602,56 €	608,53 €

Cashflow annuel	942,49 €	944,74 €	947,08 €	949,52 €	952,05 €
Cashflow cumulé (trésorerie)	198,63 €	1 143,36 €	2 090,45 €	3 039,97 €	3 992,02 €
	<b>année 11</b>	<b>année 12</b>	<b>année 13</b>	<b>année 14</b>	<b>année 15</b>
Investissement	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Rémunération revente	340,13 €	336,76 €	333,42 €	330,12 €	326,85 €
Economies d'énergie payante	614,55 €	620,63 €	626,78 €	632,99 €	639,25 €
Cashflow annuel	954,68 €	957,39 €	960,20 €	963,11 €	966,11 €
Cashflow cumulé (trésorerie)	4 946,70 €	5 904,09 €	6 864,30 €	7 827,40 €	8 793,51 €
	<b>année 16</b>	<b>année 17</b>	<b>année 18</b>	<b>année 19</b>	<b>année 20</b>
Investissement	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Rémunération revente	323,62 €	320,41 €	317,24 €	314,10 €	310,99 €
Economies d'énergie payante	645,58 €	651,97 €	658,43 €	664,95 €	671,53 €
Cashflow annuel	969,20 €	972,39 €	975,67 €	979,05 €	982,52 €
Cashflow cumulé (trésorerie)	9 762,71 €	10 735,10 €	11 710,77 €	12 689,82 €	13 672,34 €
	<b>année 21</b>				
Investissement	0,00 €				
Rémunération revente	221,74 €				
Economies d'énergie payante	678,18 €				
Cashflow annuel	899,92 €				
Cashflow cumulé (trésorerie)	14 572,27 €				

Des taux de dégradation et d'accroissement des prix sont appliqués mensuellement sur la totalité de la période considérée. Cela est réalisé dès la première année.

Les données du tableau ci-dessus sont représentées sur la figure suivante :

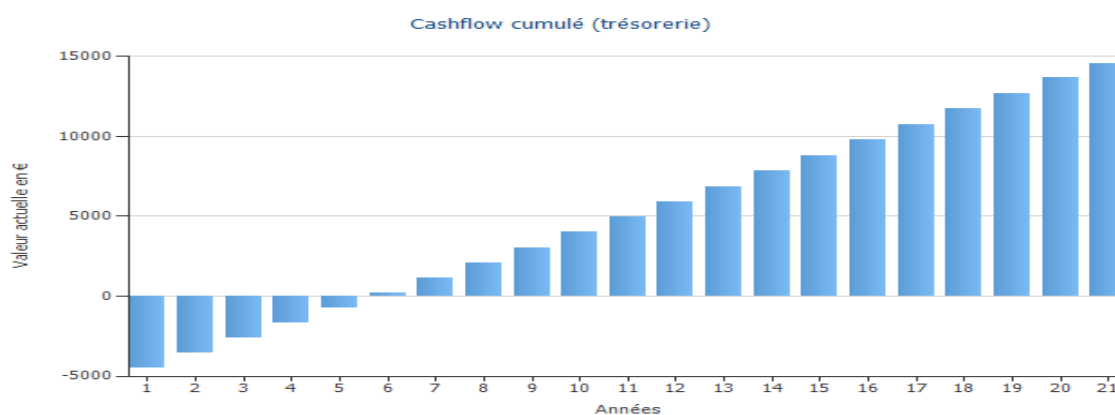


Figure IV.7

Ce diagramme nous montre qu'on peut rembourser la totalité de l'investissement réalisé sur notre installation dès la sixième année.

**IV.4 Conclusion :**

La simulation que nous avons réalisé prouve que notre installation photovoltaïque peut subvenir aux besoins d'un foyer ordinaire en énergie électrique avec un taux d'autosuffisance de 91.6%, un retour sur investissement dès la sixième année d'utilisation et même de réaliser un bénéfice sur les 20 années de service.

On peut en conclure que le photovoltaïque représente une solution réel de remplacement des énergies fossiles par une énergie verte, performante et lucrative.

## **CONCLUSION GENERALE**

---

Il est incontestable que l'énergie du soleil est l'énergie la plus répandue sur la planète, la plus abondante et la plus accessible de toutes les énergies dites renouvelables ; elle peut être consommée directement sur place pour les petites installations ou être récoltée par de grandes stations de production de plusieurs MW soit par des champs photovoltaïques ou des centrales à concentrateurs ; et acheminée vers le consommateur via des réseaux de transport.

L'étude que nous avons menée montre que le domaine du photovoltaïque est une discipline complexe de l'ingénierie ; bien que le phénomène soit connu depuis longtemps, l'application de cette technologie n'a pas pu prendre son essor que grâce aux avancées spectaculaires qu'a réalisées l'industrie de l'électronique vers toujours plus de miniaturisation et une optimisation des coûts de productions.

Il existe une concurrence féroce entre les constructeurs dans ce domaine, cette dernière ne peut être que bénéfique pour l'évolution des techniques, des composants ainsi que pour les logiciels de contrôle.

Enfin, cette étude nous a montré que l'installation d'un système photovoltaïque dans un foyer ordinaire raccordé au réseau peut se présenter comme un investissement réel pour non seulement économiser de l'énergie mais aussi la revendre et réaliser ainsi un bon bénéfice.

On peut en conclure que le photovoltaïque représente une solution réelle de remplacement des énergies fossiles par une énergie verte, performante et lucrative.



## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

---

[1] :

Rayonnement solaire, les ondes électromagnétiques

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Rayonnement\\_%C3%A9lectromagn%C3%A9tiqu](https://fr.wikipedia.org/wiki/Rayonnement_%C3%A9lectromagn%C3%A9tiqu)

[2] :

<http://www.futura-sciences.com/sciences/actualités/astonomie-ondes-gravitationnelles-troisieme-fusion-trous-noirs-detectee-ligo-67503/>

[3] : <http://www.futura-sciences.com/planete/definitions/climatologie-rayonnement-solaire-13785/>

[4] :

[http://s2.e-monsite.com/2010/02/28/09/resize\\_550\\_550/re.png](http://s2.e-monsite.com/2010/02/28/09/resize_550_550/re.png)

[5] :

absorption/optique –wikipedia

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Absorption\\_\(optique\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Absorption_(optique))

[6] :

[https://fr.wikibooks.org/wiki/Photographie/Optique/Absorption\\_de\\_la\\_lumi%C3%A8re](https://fr.wikibooks.org/wiki/Photographie/Optique/Absorption_de_la_lumi%C3%A8re)

[7] :

Cf. bande interdite

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9orie\\_des\\_bandes](https://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9orie_des_bandes)

- Université de Cergy-Pontoise. **Master 1 Physique. Cellules Photovoltaïques.**

Cellules photovoltaïques. Etude et comparaison de deux types de cellules.

[8] :

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Dopage\\_\(semi-conducteur\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Dopage_(semi-conducteur))

[9] :

p–n junction - Wikipedia

[https://en.wikipedia.org/wiki/P%E2%80%93n\\_junction](https://en.wikipedia.org/wiki/P%E2%80%93n_junction)

<http://www.pveducation.org/pvcdrom/formation-of-a-pn-junction>

[10] :

thèse : Influence des interactions impureté-défaut et impureté-impureté sur le rendement de conversion des cellules photovoltaïques au silicium cristallin

[http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/39/075/39075115.pdf](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/39/075/39075115.pdf)

[11] :

<http://s2.e-monsite.com/2010/02/25/02/structure-elec.jpg>

[12] :

[https://en.wikipedia.org/wiki/P%E2%80%93n\\_junction](https://en.wikipedia.org/wiki/P%E2%80%93n_junction)

[13] :

Caractérisation de cellules solaires

[http://www.cime.inpg.fr/images/caracterisation/TP\\_carac\\_elec\\_PV.pdf](http://www.cime.inpg.fr/images/caracterisation/TP_carac_elec_PV.pdf)

[14] :

Le **rendement** et la puissance crête des **cellules photovoltaïques**

<https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16697>

[15] :

<https://www.engineering.unsw.edu.au/energy-engineering/research/software-data-links/pc1d-software-for-modelling-a-solar-cell>

<http://pc1d.soft112.com/>

[16] :

Cécile Miquel : «SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES :  
FABRICATION ET IMPACT ENVIRONNEMENTAL», Synthèse  
réalisée par Cécile Miquel sous la direction de Bruno Gaidon, 2009,  
HESPUL ENERGIES Renouvelables et Efficacité Energétique

[17] :

<http://photovoltaique.com/> : solargie

[18] :

Caroline Boulord : « DEVELOPPEMENT DE TECHNIQUES DE  
METALLISATION INNOVANTES POUR CELLULES  
PHOTOVOLTAIQUES A HAUT RENDEMENT », Thèse de  
Doctorat, 2011, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.

[19] :

Source : Découverte n°344-345 janvier-février 2

[20] :

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Cellule\\_photovolta%C3%AFque#Prospective.2C\\_recherche\\_et\\_d.C3.A9veloppement](https://fr.wikipedia.org/wiki/Cellule_photovolta%C3%AFque#Prospective.2C_recherche_et_d.C3.A9veloppement)

[21] :

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Cellule\\_photovolta%C3%AFque#Cellule\\_photovolta.C3.AFque\\_tandem](https://fr.wikipedia.org/wiki/Cellule_photovolta%C3%AFque#Cellule_photovolta.C3.AFque_tandem)

[22] :

Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à  
contacts arrières interdigités Formation doctorale ; Nichiporuk  
Oleksiy  
N° d'ordre 2005ISAL0028 Année 2005

[23] : thèse : concepts pour la réalisation de cellules photovoltaïques à  
contacts inter digits sur substrats minces en silicium . pierre papet  
, n° d'ordre 20078\_ISAL-0106 2017 insa lyon

[24] :

[http://www.ecosources.info/dossiers/Types\\_de\\_cellules\\_photovoltaiques](http://www.ecosources.info/dossiers/Types_de_cellules_photovoltaiques)

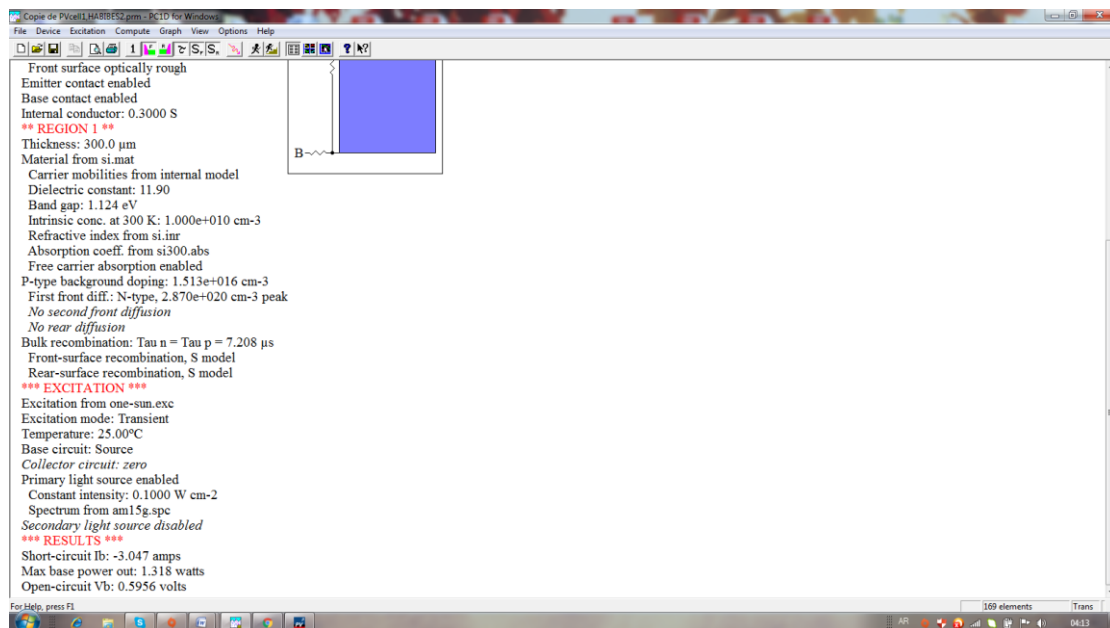
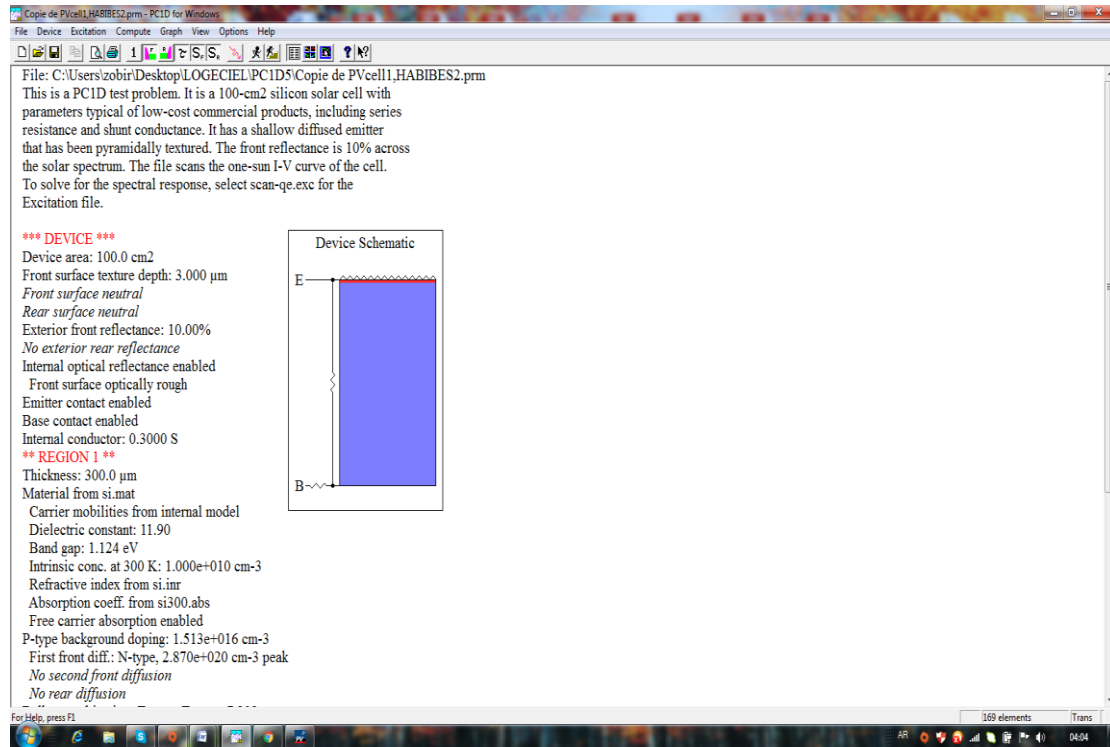
## **ANNEXES**

---

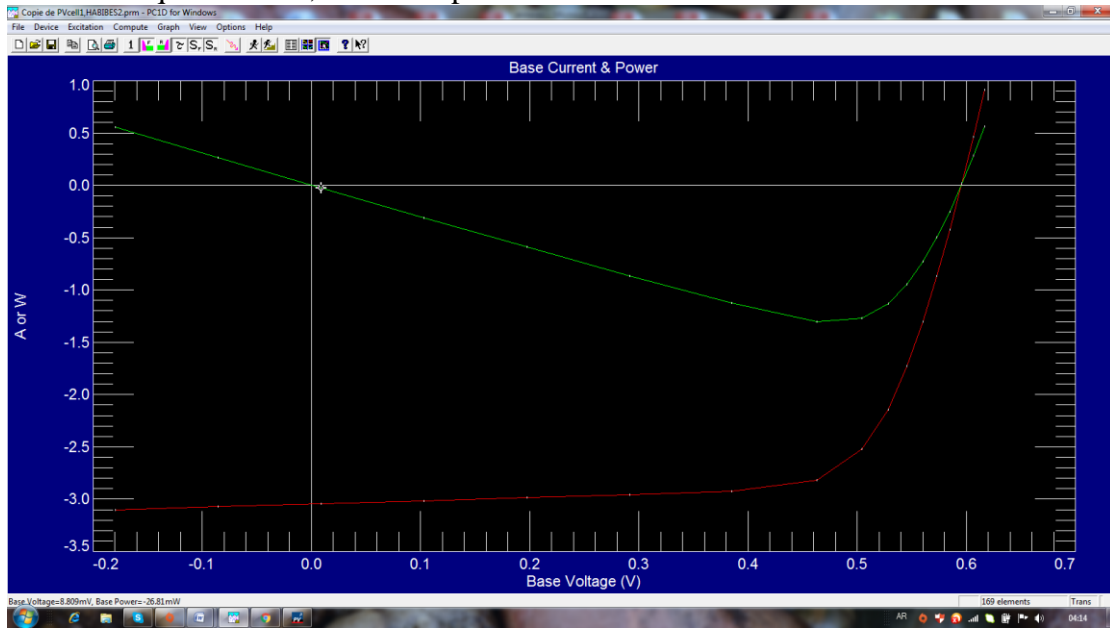
# Annexe I

## Pc1d

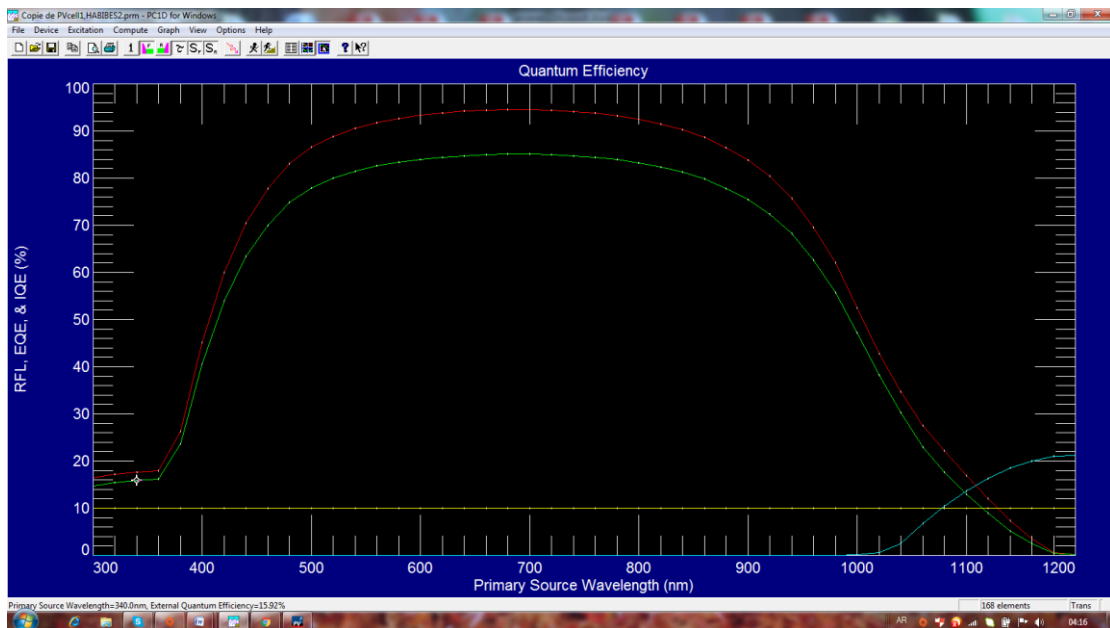
C est un logiciel qui résous l'équation de poisson et les équations de densité de différents matériaux par la méthode de calculs des éléments finis.



### Les caracteristiques tension,courant et puissance



Le rendement quantique interne IQE( rouge ),le rendement quantique externe EQE(vert)



**\*\*\* DEVICE \*\*\***

Device area: 100.0 mm<sup>2</sup>  
 Front surface texture depth: 4.000 μm

*Front surface neutral*

*Rear surface neutral*

Exterior front reflectance: 10.00%

*No exterior rear reflectance*

*No internal optical reflectance*

Emitter contact enabled

Base contact enabled

*No internal shunt elements*

**\*\* REGION 1 \*\***

Thickness: 1.000 μm

Material from si.mat

Carrier mobilities from internal model

Dielectric constant: 11.90

Band gap: 1.124 eV

Intrinsic conc. at 300 K: 1.000e+010 cm<sup>-3</sup>

Refractive index from si.inr

Absorption coeff. from si300.abs

Free carrier absorption enabled

N-type background doping: 1.000e+015 cm<sup>-3</sup>

First front diff.: N-type, 1.000e+020 cm<sup>-3</sup> peak

*No second front diffusion*

*No rear diffusion*

Bulk recombination: Tau n = Tau p = 1000 μs

*No front-surface recombination*

*No rear-surface recombination*

**\*\* REGION 2 \*\***

Thickness: 10.00 μm

Material from si.mat

Carrier mobilities from internal model

Dielectric constant: 11.90

Band gap: 1.124 eV

Intrinsic conc. at 300 K: 1.000e+010 cm<sup>-3</sup>

Refractive index from si.inr

Absorption coeff. from si300.abs

Free carrier absorption enabled

P-type background doping: 5.000e+015 cm<sup>-3</sup>

*No front diffusion*

*No rear diffusion*

Bulk recombination: Tau n = Tau p = 1000 μs

*No front-surface recombination*

*No rear-surface recombination*

**\*\*\* EXCITATION \*\*\***

Excitation from one-sun.exc

Excitation mode: Transient

Temperature: 25.00°C

Base circuit: Source

*Collector circuit: zero*

Primary light source enabled

Constant intensity: 0.1000 W cm<sup>-2</sup>

Spectrum from am15g.spc

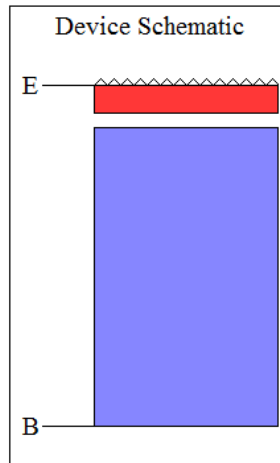
*Secondary light source disabled*

**\*\*\* RESULTS \*\*\***

Short-circuit Ib: -0.0225 amps

Max base power out: 0.0120 watts

Open-circuit Vb: 0.6422 volts





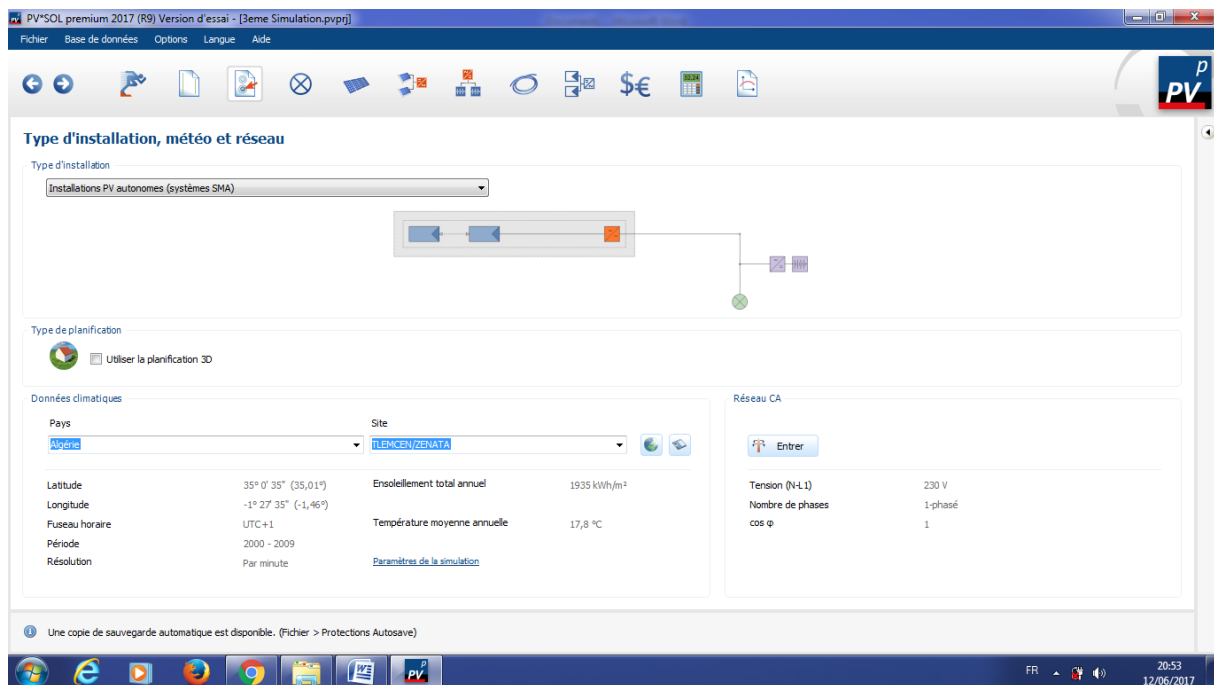
## Annexe II

### Présentation du logiciel PV Sol :

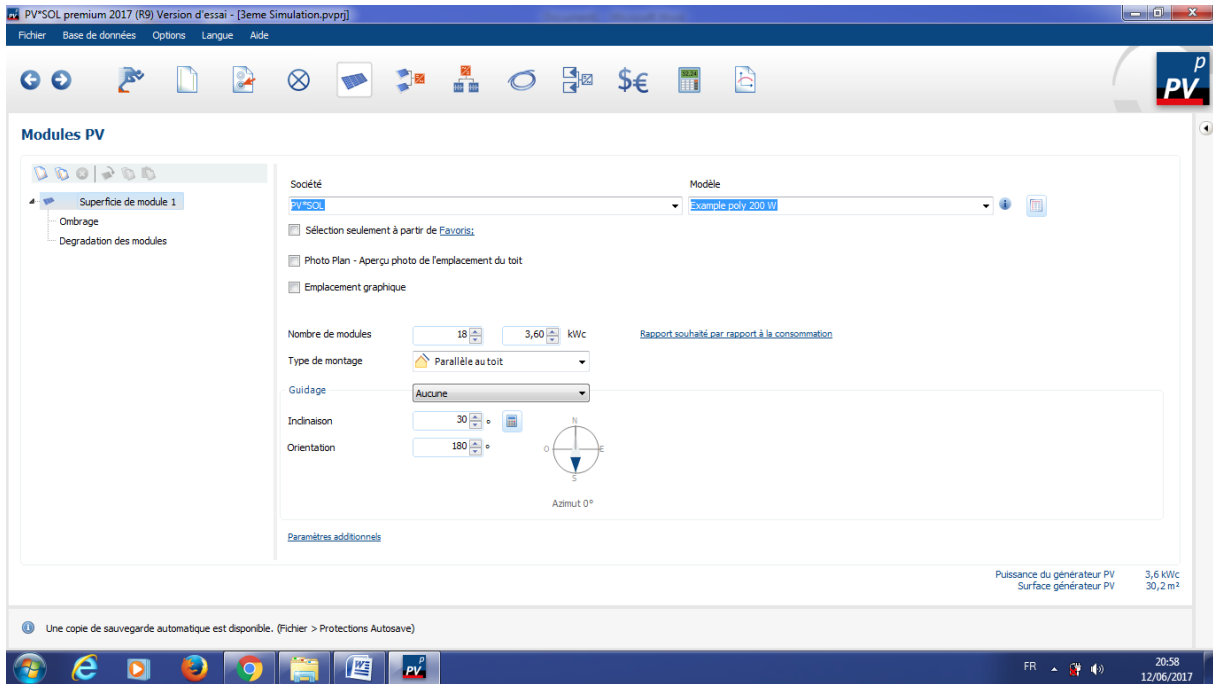
Le logiciel PV Sol est un produit de Valentine Software, c'est un logiciel dédié à la simulation et au dimensionnement de tout type d'installations photovoltaïques.

Pour notre étude, nous avons utilisé la version PV\*SOL premium 2017 (R9) Version d'essai. Cette version d'essai comprend la plupart des fonctionnalités mais il ne peut fonctionner que pendant une période de 30 jours.

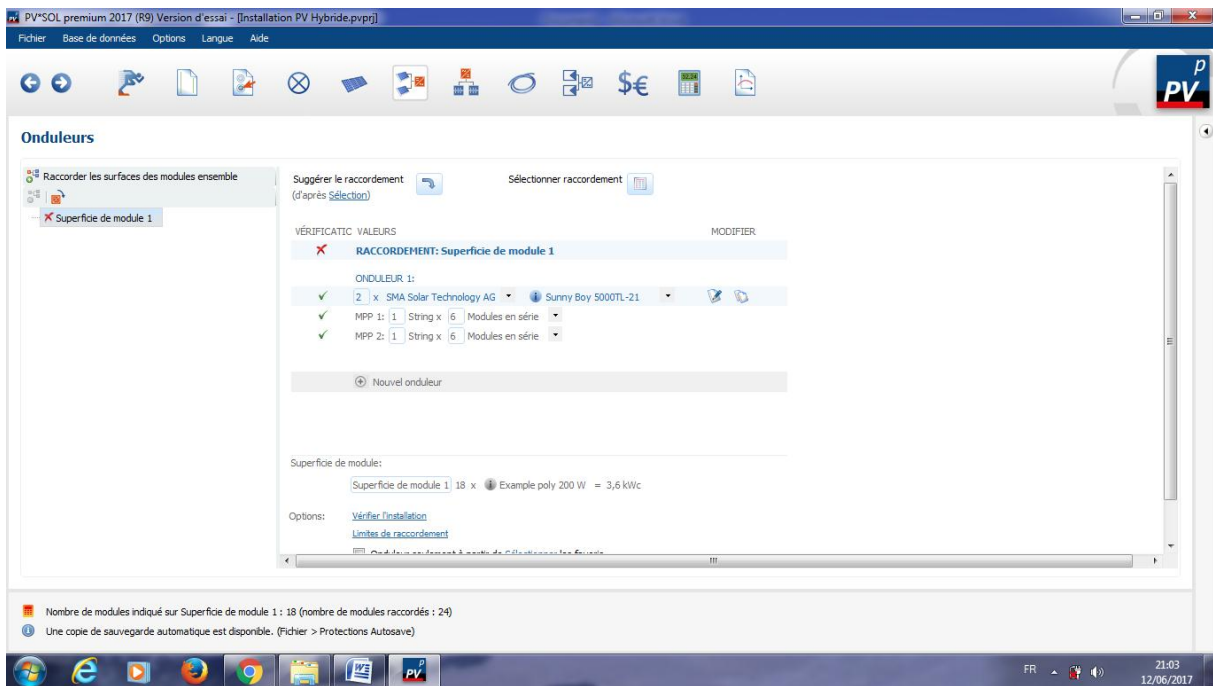
Il dispose de plusieurs bases de données : géographiques, climatique ainsi qu'une large gamme d'équipements produits par plusieurs constructeurs.



Il nous propose une interface conviviale et relativement facile à programmer, cependant il est néanmoins très précis et nous propose tout type de résultats.



Au fur et a mesure de la programmation, PV Sol nous propose plusieurs type de raccordement et d'équipement, nous pouvons choisir et tester directement si ça peut marcher une pas.



## **Annexe III**

**Décret exécutif n° 17-98 du 29 Joumada El Oula 1438 correspondant au 26 février 2017 définissant la procédure d'appel d'offres pour la production des énergies renouvelables ou de cogénération et leur intégration dans le système national d'approvisionnement en énergie électrique**



الجمهورية الجزائرية  
الديمقراطية الشعبية

# الجريدة الرسمية

اتفاقات دولية، قوانين، ومراسيم  
قرارات وآراء، مقررات، مناشير، إعلانات وبلاعات

## JOURNAL OFFICIEL

DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

CONVENTIONS ET ACCORDS INTERNATIONAUX - LOIS ET DECRETS  
ARRETES, DECISIONS, AVIS, COMMUNICATIONS ET ANNONCES

(TRADUCTION FRANÇAISE)

ABONNEMENT ANNUEL	Algérie Tunisie Maroc Libye Mauritanie	ETRANGER  (Pays autres que le Maghreb)	DIRECTION ET REDACTION SECRETARIAT GENERAL DU GOUVERNEMENT WWW. JORADP. DZ Abonnement et publicité: IMPRIMERIE OFFICIELLE Les Vergers, Bir-Mourad Raïs, BP 376 ALGER-GARE Tél : 021.54.35..06 à 09 021.65.64.63 Fax : 021.54.35.12 C.C.P. 3200-50 ALGER TELEX : 65 180 IMPOF DZ BADR: 060.300.0007 68/KG ETRANGER: (Compte devises) BADR: 060.320.0600 12
	1 An	1 An	
Edition originale.....	1090,00 D.A	2675,00 D.A	
Edition originale et sa traduction.....	2180,00 D.A	5350,00 D.A (Frais d'expédition en sus)	

Edition originale, le numéro : 13,50 dinars. Edition originale et sa traduction, le numéro : 27,00 dinars.

Numéros des années antérieures : suivant barème. Les tables sont fournies gratuitement aux abonnés.

Prière de joindre la dernière bande pour renouvellement, réclamation, et changement d'adresse.

Tarif des insertions : 60,00 dinars la ligne

**SOMMAIRE****DECRETS**

- Décret exécutif n° 17-98 du 29 Jomada El Oula 1438 correspondant au 26 février 2017 définissant la procédure d'appel d'offres pour la production des énergies renouvelables ou de cogénération et leur intégration dans le système national d'approvisionnement en énergie électrique..... 3
- Décret exécutif n° 17-99 du 29 Jomada El Oula 1438 correspondant au 26 février 2017 fixant les caractéristiques du café ainsi que les conditions et les modalités de sa mise à la consommation..... 9

**DECISIONS INDIVIDUELLES**

- Décret présidentiel du 2 Jomada Ethania 1438 correspondant au 1er mars 2017 portant nomination à la Cour de Tissemsilt..... 12
- Décret présidentiel du 3 Dhou El Hidja 1437 correspondant au 5 septembre 2016 portant nomination du directeur de l'institut national de formation spécialisée des corps spécifiques de l'administration des affaires religieuses et des wakfs dans les lectures à Alger (Rectificatif)..... 12

**ARRETES, DECISIONS ET AVIS****MINISTERE DE L'INTERIEUR ET DES COLLECTIVITES LOCALES**

- Arrêté du 5 Rabie El Aouel 1438 correspondant au 5 décembre 2016 fixant la liste nationale des personnes habilitées à effectuer l'enquête préalable en vue de l'affirmation de l'utilité publique dans le cadre des opérations d'expropriation pour cause d'utilité publique au titre de l'année 2017..... 13
- Arrêté du 10 Jomada El Oula 1438 correspondant au 7 février 2017 portant définition des caractéristiques techniques de la carte d'électeur..... 25
- Arrêté du 10 Jomada El Oula 1438 correspondant au 7 février 2017 portant le libellé et les caractéristiques techniques de l'imprimé de la procuration pour le vote à l'élection..... 26

**MINISTERE DE LA JUSTICE**

- Arrêté du 10 Jomada El Oula 1438 correspondant au 7 février 2017 portant désignation des magistrats présidents, membres et suppléants des commissions électorales des wilayas et de la commission électorale des résidents à l'étranger, pour les élections législatives du 4 mai 2017..... 28

**MINISTERE DES RESSOURCES EN EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT**

- Arrêté du 13 Moharram 1438 correspondant au 15 octobre 2016 modifiant l'arrêté du 22 Ramadhan 1437 correspondant au 27 juin 2016 portant composition de la commission sectorielle des marchés du ministère des ressources en eau et de l'environnement..... 34
- Arrêté du 15 Moharram 1438 correspondant au 17 octobre 2016 modifiant l'arrêté du 30 Ramadhan 1425 correspondant au 13 novembre 2004 fixant l'organisation et le fonctionnement de la commission permanente des eaux minérales naturelles et des eaux de source..... 34

**MINISTERE DE LA SOLIDARITE NATIONALE, DE LA FAMILLE  
ET DE LA CONDITION DE LA FEMME**

- Arrêté interministériel du 28 Safar 1438 correspondant au 28 novembre 2016 portant organisation de la direction déléguée à l'action sociale de la circonscription administrative en services et en bureaux..... 35

## DECRETS

**Décret exécutif n° 17-98 du 29 Joumada El Oula 1438 correspondant au 26 février 2017 définissant la procédure d'appel d'offres pour la production des énergies renouvelables ou de cogénération et leur intégration dans le système national d'approvisionnement en énergie électrique.**

Le Premier ministre,

Sur le rapport du ministre de l'énergie,

Vu la Constitution, notamment ses articles 99-4° et 143 (alinéa 2) ;

Vu l'ordonnance n° 75-59 du 26 septembre 1975, modifiée et complétée, portant code de commerce ;

Vu la loi n° 99-09 du 15 Rabie Ethani 1420 correspondant au 28 juillet 1999 relative à la maîtrise de l'énergie ;

Vu la loi n° 02-01 du 22 Dhou El Kaâda 1422 correspondant au 5 février 2002, modifiée et complétée, relative à l'électricité et à la distribution du gaz par canalisation, notamment son article 26 ;

Vu l'ordonnance n° 03-03 du 19 Joumada El Oula 1424 correspondant au 19 juillet 2003, modifiée et complétée, relative à la concurrence ;

Vu la loi n° 04-09 du 27 Joumada Ethania 1425 correspondant au 14 août 2004 relative à la promotion des énergies renouvelables dans le cadre du développement durable ;

Vu l'ordonnance n° 08-04 du Aouel Ramadhan 1429 correspondant au 1er septembre 2008, modifiée et complétée, fixant les conditions et modalités de concession des terrains relevant du domaine privé de l'Etat destinés à la réalisation de projets d'investissement ;

Vu la loi n° 16-09 du 29 Chaoual 1437 correspondant au 3 août 2016 relative à la promotion de l'investissement ;

Vu le décret présidentiel n° 15-125 du 25 Rajab 1436 correspondant au 14 mai 2015, modifié, portant nomination des membres du Gouvernement ;

Vu le décret exécutif n° 06-429 du 5 Dhou El Kaâda 1427 correspondant au 26 novembre 2006 fixant le cahier des charges relatif aux droits et obligations du producteur de l'électricité ;

Vu le décret exécutif n° 13-218 du 9 Chaâbane 1434 correspondant au 18 juin 2013, modifié et complété, fixant les conditions d'octroi des primes au titre des coûts de diversification de la production d'électricité ;

Vu le décret exécutif n° 15-302 du 20 Safar 1437 correspondant au 2 décembre 2015 fixant les attributions du ministre de l'énergie ;

Vu le décret exécutif n° 16-52 du 22 Rabie Ethani 1437 correspondant au 1er février 2016 fixant les règles techniques de la production d'électricité ;

Décète :

Article 1er. — En application de l'article 26 de la loi n° 02-01 du 22 Dhou El Kaâda 1422 correspondant au 5 février 2002, modifiée et complétée, relative à l'électricité et à la distribution du gaz par canalisations, le présent décret a pour objet de définir la procédure d'appel d'offres pour la production des énergies renouvelables ou de la cogénération et leur intégration dans le système national d'approvisionnement en énergie électrique.

TITRE I

### DISPOSITIONS GENERALES

Art. 2. — Au sens du présent décret, on entend par :

\* **Energies renouvelables** : toutes énergies provenant de sources hydraulique, solaire thermique, éolienne, géothermique, solaire rayonnante, biomasse ainsi que la valorisation des déchets.

\* **Appel d'offres à investisseurs ou aux enchères** : la procédure permettant le choix de l'offre la plus avantageuse économiquement, sur la base de critères objectifs préalablement portés à la connaissance des candidats :

— il concerne la réalisation et l'exploitation d'installations d'énergies renouvelables et la commercialisation de l'électricité produite à partir de sources d'énergies renouvelables ;

— il est à investisseurs, lorsque son lancement intervient à l'initiative du ministre chargé de l'énergie, pour des quantités d'énergies renouvelables préalablement déterminées et dans les conditions définies dans le présent décret ;

— il est aux enchères, lorsque son lancement intervient à l'initiative de la commission de régulation de l'électricité et du gaz, pour des offres de fourniture d'énergies renouvelables correspondant à une puissance minimale préalablement déterminée et dans les conditions définies dans le présent décret.

\* **Cogénération** : production combinée, au sein d'une même installation industrielle, d'au moins deux énergies utiles (électricité et chaleur), à partir d'énergie primaire.

\* **Partenariat** : désigne l'association ou l'alliance entre deux (2) ou plusieurs parties qui donne lieu, dans le respect de la législation et de la réglementation en vigueur :

— soit à la création d'une co-entreprise ayant la forme juridique d'une société par actions ou d'une société à responsabilité limitée ;

— soit à l'ouverture du capital social d'une société existante dont lesdites parties sont actionnaires ou associées.

\* **Réseaux électriques** : ensemble des infrastructures constituant, selon le cas, le réseau de transport ou de distribution permettant d'acheminer l'énergie électrique produite à partir d'installations d'énergies renouvelables.

\* **Site** : lieu où est implantée une installation d'énergies renouvelables.

\* **Installation d'énergies renouvelables** : ensemble d'équipements destiné à la production de l'électricité à partir de sources d'énergies renouvelables.

\* **Investisseur** : personne physique ou morale, de droit privé ou public, qui investit des capitaux pour la réalisation de centrales de production d'électricité d'origine renouvelable, dans le cadre d'un appel d'offres à investisseurs ou aux enchères.

\* **Projet industriel** : projet d'investissement dans la fabrication d'équipements utilisés dans la production d'électricité à partir de sources d'énergies renouvelables et / ou dans la fourniture de services.

\* **Soumissionnaire** : investisseur qui répond à un appel d'offres à investisseurs ou aux enchères.

\* **Soumission** : ensemble de documents écrits dans lequel un soumissionnaire expose son offre et s'engage à respecter le cahier des charges y afférent.

Art. 3. — Le présent décret s'applique aux appels d'offres à investisseurs ou aux enchères pour la conception, la fourniture d'équipements, la construction et l'exploitation des installations de production de l'électricité à partir de sources d'énergies renouvelables, destinés à la commercialisation.

La nature et les capacités des moyens de production à partir d'énergies renouvelables, sont définies dans le programme indicatif des moyens de production approuvé par le ministre chargé de l'énergie, conformément à l'article 8 de la loi n° 02-01 du 22 Dhou El Kaâda 1422 correspondant au 5 février 2002, susvisée, et qui s'inscrit dans le cadre de la mise en œuvre du programme national de développement des énergies renouvelables.

Art. 4. — Les quantités d'énergies renouvelables, pour chaque appel d'offres, cité à l'article 2 ci-dessus, sont fixées dans le cahier des charges dudit appel d'offres.

## TITRE II

### DE L'APPEL D'OFFRES A INVESTISSEURS

Art. 5. — L'appel d'offres à investisseurs porte sur la réalisation d'installations de production d'électricité à partir de sources d'énergies renouvelables.

Il recouvre la conception, la fourniture d'équipements, la construction et l'exploitation d'installations de production d'électricité à partir de sources d'énergies renouvelables, ainsi que la commercialisation de l'électricité produite.

La participation à l'appel d'offres à investisseurs, est conditionnée par la réalisation d'un projet industriel sauf, s'il y a lieu, décision conjointe contraire du ministre chargé de l'énergie et du ministre chargé de l'industrie.

Dans le cadre de la mise en œuvre de l'appel d'offres à investisseurs :

— le ministre chargé de l'énergie identifie l' ou les entreprise(s) publique(s) devant participer, seule(s) ou en partenariat dans la réalisation et l'exploitation des installations de production d'électricité à partir de sources d'énergies renouvelables ;

— les ministres chargés de l'énergie et de l'industrie, le cas échéant, chacun en ce qui le concerne, identifient l' ou les entreprise(s) publique(s) devant participer, seule(s) ou en partenariat, dans le projet industriel.

Dans le cas où l'investisseur soumissionnaire n'est pas lui-même investisseur dans le projet industriel, l'offre doit, sous peine de rejet, être accompagnée d'une soumission par un ou plusieurs investisseur(s) tiers que l'investisseur soumissionnaire aura choisi(s) pour la réalisation du projet industriel.

Art. 6. — L'appel d'offres pour la réalisation d'une installation de production de l'électricité à partir de sources d'énergies renouvelables, doit préciser les données des sites, rattachées au système national géodésique, la superficie, la distance par rapport au point d'injection, les accès et les délimitations des sites ainsi qu'une description succincte de leur environnement.

Art. 7. — Les sites des installations de production de l'électricité à partir de sources d'énergies renouvelables, objet de l'appel d'offres à investisseurs, tel que défini à l'article 2 ci-dessus, sont désignés par le ministre chargé de l'énergie, sur proposition de la commission de régulation de l'électricité et du gaz.

Art. 8. — La réalisation des installations d'évacuation de l'énergie produite et de raccordement aux réseaux électriques, sont à la charge de l'investisseur.

L'accès aux réseaux électriques est accordé, sous réserve du respect, par l'investisseur, des conditions de sécurité de ces réseaux.

Art. 9. — Le ministre chargé de l'énergie lance l'appel d'offres à investisseurs et en assure le traitement.

Le ministre chargé de l'énergie peut, toutefois, charger un organisme ou une entreprise publique de la préparation et du traitement de l'appel d'offres.

Art. 10. — L'appel d'offres à investisseurs est ouvert à tout investisseur désirant réaliser et exploiter des installations de production d'électricité à partir de sources d'énergies renouvelables, conformément aux dispositions définies à l'article 5 ci-dessus.

Art. 11. — Les conditions auxquelles doit satisfaire l'investisseur sont fixées dans le cahier des charges de l'appel d'offres à investisseurs. Elles portent notamment sur :

— les caractéristiques énergétiques et techniques de l'installation utilisant les énergies renouvelables, notamment les énergies primaires utilisées, la puissance, la disponibilité, les performances exigées en matière de rendement énergétique ;

— le délai de mise en service de l'installation et la production annuelle possible et les régimes d'utilisation possibles ;

— les conditions économiques et financières, notamment la période de commercialisation de l'électricité produite, pour chaque installation de production, qui ne saurait excéder vingt-cinq (25) ans ;

— les conditions d'exploitation et le nombre d'heures de fonctionnement prévu ;

— l'occupation du site ;

— la protection de l'environnement notamment le site d'implantation de l'installation ;

— les garanties financières qui doivent être en rapport avec l'objet de l'appel d'offres à investisseurs et que le soumissionnaire retenu est tenu de respecter en vue d'assurer la bonne fin des opérations.

Art. 12. — Les soumissions à l'appel d'offres se font en une seule étape. Elles doivent comporter obligatoirement :

**a) Pour la composante énergétique :**

1. Une offre technique comprenant :

— un dossier administratif dont le contenu est fixé dans le cahier des charges ;

— un dossier technique définissant les caractéristiques, la consistance, les capacités et la nature des équipements constituant les installations à réaliser. Il doit préciser les conditions d'exploitation et de maintenance et, comporter également une évaluation de l'impact sur l'environnement, notamment, le gain en CO<sub>2</sub> pendant toute la durée de vie des installations.

2. Une offre financière et commerciale comprenant :

— une évaluation financière détaillée comprenant toutes les dépenses d'investissement, d'exploitation et de maintenance ;

— le prix de cession du kWh produit ainsi que les conditions de révision du prix de cession du kWh.

**b) S'il y a lieu, pour la composante industrielle :**

1. Une offre de réalisation d'un projet industriel conformément au dossier d'appel d'offres.

2. Une offre financière et commerciale comprenant :

— une évaluation financière détaillée comprenant toutes les dépenses d'investissement, d'exploitation et de maintenance ;

— le prix des équipements et composants fabriqués ainsi que les conditions de révision du prix, éventuellement.

**c) Modèle économique d'évaluation ;**

et tout autre document exigé conformément au dossier de l'appel d'offres.

L'ensemble des offres énumérées ci-dessus ainsi que le modèle économique d'évaluation doivent être remis concomitamment.

Art. 13. — L'avis d'appel d'offres à investisseurs mentionne, notamment :

— l'objet de l'appel d'offres à investisseurs ;

— les candidats admis à participer à l'appel d'offres à investisseurs ;

— l'exigence de réalisation d'un projet industriel dans le domaine des énergies renouvelables, s'il y a lieu ;

— la date et l'heure limites d'envoi des dossiers de soumission à l'appel d'offres à investisseurs ;

— la date et le lieu d'ouverture des offres ;

— la durée de validité des offres ;

— le lieu où le cahier des charges de l'appel d'offres à investisseurs peut être retiré ;

— la forme de présentation des offres ;

— le montant de la somme à verser pour le retrait du cahier des charges ;

— le montant de la caution de soumission ;

— le montant de la caution de garantie d'investissement.

Art. 14. — Il est créé, auprès du ministre chargé de l'énergie, une commission *ad hoc*, chargée du traitement des offres de l'appel d'offres à investisseurs.

La composition, les attributions et le mode de fonctionnement de cette commission sont définis par décision du ministre chargé de l'énergie.

Lorsque l'appel d'offres à investisseurs comporte une composante industrielle, le ministre chargé de l'industrie désigne ses représentants au sein de cette commission.

Art. 15. — La commission établit un rapport d'évaluation qui comporte :

1- La liste des offres conformes ;

2- La liste des offres non conformes accompagnée des justificatifs des motifs de non-conformité ;

3- Le classement des offres conformes selon les prix de cession du kWh issus du modèle économique d'évaluation.

Le rapport d'évaluation contenant les éléments précédents est transmis au ministre chargé de l'énergie et, le cas échéant, au ministre chargé de l'industrie.

Art. 16. — Après avis de la commission de régulation de l'électricité et du gaz sur le prix de cession du kWh issu du modèle économique d'évaluation de l'appel d'offres à investisseurs, le soumissionnaire retenu reçoit une notification écrite d'acceptation de son offre, par le ministre chargé de l'énergie ou l'organe dûment mandaté, contenant le prix de cession du kWh issu du modèle économique d'évaluation de l'appel d'offres à investisseurs.



Les soumissionnaires non retenus, sont tenus informés par notification écrite dans les mêmes formes que celles prévues à l'alinéa précédent.

Les offres commerciales dont les offres techniques sont jugées non conformes, sont restituées aux soumissionnaires, sans être ouvertes.

Art. 17. — En cas de désistement ou de défaillance d'un soumissionnaire retenu à l'issue de l'appel d'offres à investisseurs, le ministre chargé de l'énergie peut retenir, après avis de la commission de régulation de l'électricité et du gaz, le soumissionnaire suivant, selon l'ordre de classement.

Dans les cas de désistement ou de défaillance, la caution de soumission sera mise en jeu.

Art. 18. — La remise d'une offre d'investissement dans le cadre de l'appel d'offres à investisseurs, vaut engagement du soumissionnaire à respecter, s'il est retenu, l'ensemble des obligations et prescriptions figurant dans le cahier des charges de l'appel d'offres.

Art. 19. — Une commission de recours est créée auprès du ministre chargé de l'énergie.

Les soumissionnaires non retenus, peuvent introduire un recours auprès du président de la commission de recours, dans un délai de dix (10) jours, à compter de la date de notification, visée à l'article 16 ci-dessus.

Tout recours donne lieu à une réponse motivée, dans les huit (8) jours qui suivent la date de réception de la demande de recours.

Art. 20. — L'appel d'offres à investisseurs est déclaré infructueux dans les cas suivants :

- lorsqu'il n'a fait l'objet d'aucune soumission ;
- lorsqu'une seule soumission est jugée conforme ;
- lorsque le prix de cession du kWh, issu de l'appel d'offres à investisseurs, est jugé excessif par la commission de régulation de l'électricité et du gaz.

Dans ce dernier cas et, préalablement à la publication de l'infructuosité, le ministre chargé de l'énergie peut demander une nouvelle offre de prix de cession du kWh aux soumissionnaires.

Art. 21. — La commission de régulation de l'électricité et du gaz délivre à chaque soumissionnaire retenu, dans le cadre de l'appel d'offres à investisseurs, le certificat de garantie d'origine et l'autorisation d'exploiter, conformément à la réglementation en vigueur.

Art. 22. — Les contrats prévus par le cahier des charges de l'appel d'offres à investisseurs, sont conclus, avant l'expiration du délai de validité des offres, avec le soumissionnaire retenu ayant reçu contre accusé de réception, la notification écrite, visée à l'article 15 ci-dessus.

Le contrat d'achat d'électricité est conclu entre les producteurs et l'opérateur système ou tout autre opérateur concerné.

### TITRE III

#### DE L'APPEL D'OFFRES AUX ENCHERES

Art. 23. — Sur proposition de la commission de régulation de l'électricité et du gaz, le ministre chargé de l'énergie fixe :

- le volume annuel de quantités d'énergie renouvelables devant faire l'objet d'appels d'offres aux enchères, qui ne peut être inférieur à 10 GWh, ainsi que,
- le volume annuel d'énergie issue de la cogénération.

Art. 24. — L'appel d'offres pour la mise aux enchères de quantités d'énergies, concerne :

- la réalisation d'installations de production d'énergies renouvelables dont les quantités annuelles produites sont comprises entre 10 GWh et 20 GWh par site ainsi que,
- la fixation des quantités annuelles produites par les installations de cogénération dont la puissance électrique ne peut excéder 12 MW.

Art. 25. — Le choix et l'acquisition des sites, y compris par voie de concession, sont du ressort du soumissionnaire. Toutefois, le soumissionnaire devra respecter les conditions techniques de raccordement aux réseaux d'évacuation de l'énergie produite, fixées dans le cahier des charges de l'appel d'offres aux enchères.

Art. 26. — La réalisation des installations d'évacuation de l'énergie produite et de raccordement aux réseaux électriques, sont à la charge de l'investisseur.

L'accès aux réseaux électriques est accordé, sous réserve du respect, par l'investisseur, des conditions de sécurité de ces réseaux.

Art. 27. — La commission de régulation de l'électricité et du gaz, lance et traite l'appel d'offres aux enchères. Les dossiers de soumissions sont réceptionnés et évalués conformément au cahier des charges.

Art. 28. — L'appel d'offres aux enchères est ouvert à toute personne physique ou morale, désirant réaliser et exploiter des installations de production d'électricité à partir de sources d'énergies renouvelables et, justifiant des capacités techniques, économiques et financières.

Art. 29. — Les conditions auxquelles doit satisfaire l'investisseur sont fixées dans le cahier des charges de l'appel d'offres aux enchères. Elles portent notamment sur :

— les caractéristiques énergétiques et techniques de l'installation utilisant les énergies renouvelables, notamment les énergies primaires utilisées, la puissance, la disponibilité, les performances exigées en matière de rendement énergétique ;

— le délai de mise en service de l'installation et la production annuelle possible, ainsi que les régimes d'utilisation possibles ;

— les conditions économiques et financières, notamment la période de commercialisation de l'électricité produite, pour chaque installation de production, qui ne saurait excéder vingt-cinq (25) ans ;

— les conditions d'exploitation et le nombre d'heures de fonctionnement prévu ;

— l'occupation du site ;

— la protection de l'environnement du site d'implantation de l'installation ;

— les garanties financières qui doivent être en rapport avec l'objet de l'appel d'offres aux enchères et que le soumissionnaire retenu est tenu de respecter en vue d'assurer la bonne fin des opérations.

Art. 30. — L'offre du soumissionnaire à l'appel d'offres aux enchères, doit comporter :

1. Une offre technique comprenant :

— un dossier administratif dont le contenu est fixé dans le cahier des charges ;

— un dossier technique définissant les caractéristiques, la consistance, les capacités et la nature des équipements constituant les installations à réaliser. Il doit préciser les conditions d'exploitation et de maintenance et, comporter également une évaluation de l'impact sur l'environnement, notamment le gain en CO<sub>2</sub> pendant toute la durée de vie des installations.

2. Une offre commerciale comprenant :

— une évaluation financière détaillée comprenant toutes les dépenses d'investissement, d'exploitation et de maintenance ;

— le prix de cession du kWh produit ainsi que les conditions de révision du prix de cession du kWh.

Art. 31. — Le dossier d'appel d'offres aux enchères comporte, notamment :

— les termes de références ;

— les instructions aux candidats ;

— le projet de contrat d'achat d'électricité.

Art. 32. — L'avis d'appel d'offres aux enchères mentionne, notamment :

— l'objet de l'appel d'offres aux enchères ;

— les candidats admis à participer à l'appel d'offres aux enchères ;

— la date et l'heure limites d'envoi des dossiers de soumission à l'appel d'offres aux enchères ;

— la date et le lieu d'ouverture des offres ;

— la durée de validité des offres ;

— le lieu où le cahier des charges de l'appel d'offres aux enchères peut être retiré ;

— la forme de présentation des offres ;

— le montant de la somme à verser pour le retrait du cahier des charges ;

— le montant de la caution de soumission.

Art. 33. — Il est créé, au sein de la commission de régulation de l'électricité et du gaz, une commission *ad hoc*, chargée de l'examen des offres soumises dans le cadre de l'appel d'offres aux enchères suivant des critères préalablement définis.

La composition, les attributions et le mode de fonctionnement de cette commission, sont définis par décision du président de la commission de régulation de l'électricité et du gaz.

Art. 34. — La commission *ad hoc* est responsable du processus d'évaluation des offres, pendant toute la période de validité des offres, qui ne saurait excéder quatre (4) mois, jusqu'à la mise en place des contrats d'achat ainsi que des garanties requises.

Art. 35. — La commission de régulation de l'électricité et du gaz, accuse réception des dossiers de soumission à l'appel d'offres aux enchères de chaque candidat. Tout pli reçu après la date et l'heure limites, fixées dans l'appel d'offres aux enchères, est retourné au candidat sans être ouvert.

Art. 36. — Les soumissions à l'appel d'offres aux enchères, se font en une seule étape avec remise concomitante des offres techniques et commerciales.

Toutefois, si le cahier des charges le prévoit, l'ouverture des plis des offres commerciales peut avoir lieu à une date ultérieure à la date d'ouverture des offres techniques, sous les conditions suivantes :

— les plis des offres commerciales doivent être remis séance tenante pour conservation, à un huissier de justice. Chaque pli sera de nouveau scellé de façon anonyme et, chaque soumissionnaire présent apposera son visa sur le pli ainsi scellé ;

— la séance d'ouverture et d'évaluation des offres commerciales sera publique et, les soumissionnaires seront invités à y assister, au moins, dix (10) jours à l'avance.

La commission *ad hoc* chargée d'évaluer les offres soumises, dans le cadre de l'appel d'offres aux enchères, se réunit à la date fixée dans l'appel d'offres aux enchères.

Dans tous les cas, l'ouverture des plis est faite en séance publique.

La commission *ad hoc* chargée d'évaluer les offres soumises, dans le cadre de l'appel d'offres aux enchères, instruit les dossiers dans un délai fixé dans l'appel d'offres aux enchères, après la réception des offres techniques et désigne, sur la base des critères de qualification et de conformité technique contenus dans l'appel d'offres aux enchères, les candidats retenus pour la remise et l'évaluation des offres commerciales.

Les candidats retenus sont classés selon l'ordre croissant du prix de cession du kWh offert.

La commission de régulation de l'électricité et du gaz avise, par écrit le ou les candidats retenus et non retenus.

L'affectation des volumes de quantités d'énergies renouvelables, est offerte au candidat offrant le prix de cession du kWh le plus bas.

Si le quota proposé n'est pas atteint, le soumissionnaire classé second pourra bénéficier du reliquat, à condition qu'il aligne son prix de cession du kWh sur celui du premier et ainsi de suite, jusqu'à épuisement du quota des quantités mises aux enchères.

Art. 37. — Le comité de direction de la commission de régulation de l'électricité et du gaz, valide les résultats de la commission *ad hoc* chargée d'évaluer les offres soumises dans le cadre de l'appel d'offres aux enchères, pendant la durée de validité des offres fixée ci-dessus.

La commission *ad hoc* établit un rapport d'évaluation qui comporte :

- 1- la liste des offres conformes ;
- 2- la liste des offres non conformes accompagnée des justificatifs des motifs de non-conformité ;
- 3- le classement des offres conformes selon les prix de cession du kWh issus des enchères ;
- 4- la liste des projets qu'elle propose de retenir.

Le rapport d'évaluation contenant les éléments précédents est transmis au président de la commission de régulation de l'électricité et du gaz pour approbation, dans un délai ne dépassant pas un (1) mois.

La commission de régulation de l'électricité et du gaz, libère les cautions de soumission de tous les candidats, une fois que le ou les candidat(s) retenu(s) ai(en)t remis la caution de garantie de bonne exécution et payé les frais d'études de l'autorisation d'exploiter, conformément à la réglementation en vigueur.

Art. 38. — En cas de désistement ou de défaillance d'un candidat retenu à l'issue de l'appel d'offres aux enchères, la commission de régulation de l'électricité et du gaz, retient le candidat suivant selon l'ordre de classement du prix de cession du kWh.

Dans les cas de désistement ou de défaillance, la caution de soumission sera mise en jeu.

Art. 39. — La remise d'une offre dans le cadre de l'appel d'offres aux enchères, vaut engagement du candidat à respecter, s'il est retenu, l'ensemble des obligations et prescriptions de toute nature figurant au cahier des charges et, à mettre en service l'installation dans les conditions de l'appel d'offres aux enchères.

Art. 40. — Une commission de recours, est créée auprès du président de la commission de régulation de l'électricité et du gaz.

Les candidats non retenus, après l'évaluation des soumissions de l'appel d'offres aux enchères, peuvent introduire un recours auprès de la commission de recours, dans un délai de dix (10) jours, à compter de la date de notification.

Tout recours donne lieu à une réponse motivée de la part de la commission de recours, dans les huit (8) jours suivant la date de réception du recours en question.

Art. 41. — L'appel d'offres aux enchères est déclaré infructueux dans les cas suivants :

- lorsqu'il n'a fait l'objet d'aucune soumission ;
- lorsqu'une seule soumission est jugée conforme ;
- lorsque les prix de cession du kWh, issus de l'appel d'offres aux enchères, sont jugés excessifs par la commission de régulation de l'électricité et du gaz.

Art. 42. — Avant l'expiration du délai de validité des offres, le soumissionnaire retenu reçoit, contre accusé de réception, une notification écrite de l'acceptation de son offre, contenant le prix de cession du kWh, issu de l'appel d'offres aux enchères.

Le contrat d'achat d'électricité est conclu entre les producteurs et l'opérateur système ou tout autre opérateur concerné.

Art. 43. — La commission de régulation de l'électricité et du gaz, délivre à chaque soumissionnaire retenu, dans le cadre de l'appel d'offres aux enchères, le certificat de garantie d'origine et l'autorisation d'exploiter, conformément à la réglementation en vigueur.

Art. 44. — Le présent décret sera publié au *Journal officiel* de la République algérienne démocratique et populaire.

Fait à Alger, le 29 Jomada El Oula 1438 correspondant au 26 février 2017.

Abdelmalek SELLAL.

**Décret exécutif n° 17-99 du 29 Jumada El Oula 1438  
correspondant au 26 février 2017 fixant les  
caractéristiques du café ainsi que les conditions et  
les modalités de sa mise à la consommation.**

-----

Le Premier ministre,

Sur le rapport du ministre du commerce,

Vu la Constitution, notamment ses articles 99-4° et 143 (alinéa 2) ;

Vu la loi n° 09-03 du 29 Safar 1430 correspondant au 25 février 2009, modifiée, relative à la protection du consommateur et à la répression des fraudes ;

Vu la loi n° 04-04 du 5 Jumada El Oula 1425 correspondant au 23 juin 2004, modifiée et complétée, relative à la normalisation ;

Vu le décret présidentiel n° 05-118 du 2 Rabie El Aouel 1426 correspondant au 11 avril 2005 relatif à l'ionisation des denrées alimentaires ;

Vu le décret présidentiel n° 15-125 du 25 Rajab 1436 correspondant au 14 mai 2015, modifié, portant nomination des membres du Gouvernement ;

Vu le décret exécutif n° 91-04 du 19 janvier 1991 relatif aux matériaux destinés à être mis en contact avec les denrées alimentaires et les produits de nettoyage de ces matériaux ;

Vu le décret exécutif n° 91-53 du 23 février 1991 relatif aux conditions d'hygiène lors du processus de la mise à la consommation des denrées alimentaires ;

Vu le décret exécutif n° 92-30 du 20 janvier 1992, modifié et complété, relatif aux spécifications et à la présentation des cafés ;

Vu le décret exécutif n° 04-319 du 22 Chaâbane 1425 correspondant au 7 octobre 2004 fixant les principes d'élaboration, d'adoption et de mise en œuvre des mesures sanitaires et phytosanitaires ;

Vu le décret exécutif n° 04-320 du 22 Chaâbane 1425 correspondant au 7 octobre 2004 relatif à la transparence des mesures sanitaires et phytosanitaires et des obstacles techniques au commerce ;

Vu le décret exécutif n° 12-203 du 14 Jumada Ethania 1433 correspondant au 6 mai 2012 relatif aux règles applicables en matière de sécurité des produits ;

Vu le décret exécutif n° 12-214 du 23 Jumada Ethania 1433 correspondant au 15 mai 2012 fixant les conditions et les modalités d'utilisation des additifs alimentaires dans les denrées alimentaires destinées à la consommation humaine ;

Vu le décret exécutif n° 13-378 du 5 Moharram 1435 correspondant au 9 novembre 2013 fixant les conditions et les modalités relatives à l'information du consommateur ;

Vu le décret exécutif n° 14-366 du 22 Safar 1436 correspondant au 15 décembre 2014 fixant les conditions et les modalités applicables en matière de contaminants tolérés dans les denrées alimentaires ;

Vu le décret exécutif n° 15-172 du 8 Ramadhan 1436 correspondant au 25 juin 2015 fixant les conditions et les modalités applicables en matière de spécifications microbiologiques des denrées alimentaires ;

**Décète :**

Article 1er. — Conformément aux dispositions des articles 10 et 11 de la loi n° 09-03 du 29 Safar 1430 correspondant au 25 février 2009, susvisée, le présent décret a pour objet de fixer les caractéristiques du café ainsi que les conditions et les modalités de sa mise à la consommation.

Art. 2. — Le nom "café" avec ou sans qualificatif et toute dénomination contenant soit le mot "café", soit un dérivé de ce mot, soit le nom d'une espèce, au sens de l'article 3 ci-après, ou d'une variété de ces espèces sont réservés aux produits définis au présent décret.

Art. 3. — La dénomination "café vert" ou "café brut" est réservée aux grains ou aux fèves issus des fruits de plantes des espèces cultivées du genre *Coffea*.

Le café vert est constitué de fèves d'une seule espèce botanique. Il doit être de qualité saine, loyale et marchande.

Les fèves doivent être débarrassées de leur parche, n'avoir subi aucun retranchement de leurs principes constituants, ni aucune altération ou contamination, notamment par pourriture ou moisissure, ni dégager aucune odeur mauvaise ou étrangère au café.

Les teneurs en poids admissibles en matières étrangères et en humidité, sont fixées comme suit :

- teneur en eau ou en humidité doit être inférieure à..... 12,5% ;
- teneur en matières étrangères ne doit pas dépasser..... 0,5%.

Art. 4. — La dénomination "café" sans qualificatif est réservée au produit résultant de la torréfaction de café vert, tel que défini à l'article 3 ci-dessus, et n'ayant subi aucun retranchement de ses principes constituants.

Art. 5. — Le café vert doit être torréfié à des températures conformes à la réglementation en vigueur ou, à défaut, aux normes internationales.

Art. 6. — Le café torréfié ne doit dégager aucune mauvaise odeur ni présenter de mauvais goût. Les teneurs maximales en poids admissibles en pierres ou autres matières étrangères, en cendres et en eau, sont fixées comme suit :

- teneur en pierres ou autres matières étrangères au café ..... 1 % ;
- teneur en eau ou en humidité..... 5 % ;
- teneur en cendres ..... 6 %.