



Université Saâd Dahlab, Blida-1  
Faculté de Technologie  
Département des Énergies Renouvelables



Travail réaliser par : IZRI Mohamed El Amine

Pour l'obtention du diplôme :  
**MASTER en Énergies Renouvelables**

Option : Conversion Photovoltaïque

Thème :  
**Contribution d'un algorithme de gestion d'énergie  
dans une maison solaire photovoltaïque**

Soutenu le :

Soutenu devant le jury composé par :

Président :

Promotrice : Dr : CHEKIRED .F

Examineur :

Juin 2017

## **REMERCIEMENTS**

*Ce travail a été réalisé dans le cadre de la préparation d'un mémoire de master en énergie renouvelable, PHOTOVOLTAÏQUE au Département des énergies renouvelables de l'université Saad Dahlab de Blida 1, sous la direction du Mr.DOUMAZ que je remercie vivement pour toute l'aide qu'il m'a apportée durant toute la durée de préparation du présent mémoire.*

*Je tiens également à remercier Dr. CHEKIRED Fathia eps Chikhi pour l'aide et les conseils qu'elle m'a apporté en sa qualité de promotrice du présent travail.*

*Tout comme je remercie l'ensemble du personnel de l'Unité de Développement des Equipements Solaire (UDES) pour l'aide qu'ils ont apportée durant la préparation du présent travail.*

*Mes plus vifs remerciements vont à Mr (Mme) ; pour m'avoir fait l'honneur de présider le jurée de soutenance du présent mémoire.*

*Le remercie vivement Mr (Mme) ; pour l'honneur qu'ils m'ont fait en participant au jury en qualité d'examineurs.*

*Enfin, je souhaite exprimer toute ma gratitude à l'ensemble des enseignants personnes qui ont largement contribué à son aboutissement.*

# Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail en premier lieu à mes parents  
qui m'ont soutenus pour me permettre de réaliser tous mes  
objectifs et qu'ils trouvent ici toute ma reconnaissance et  
ma gratitude.*

*A mon frère, mes sœurs, ma moitié et toute ma famille  
A tous mes enseignants depuis le primaire jusqu'à maintenant  
surtouts nos enseignants du département des énergies  
renouvelables en particulier*

*Mr : SOUKEL.K*

*A tous mes camarades et mes amis en particulier Akram,  
Braham, Mustapha, Abderrahmane, Syphax, Youcef, Amine,  
Oussama*

*A tous les personnels de l'UDES en particulier les  
responsables de la bibliothèque et surtout*

*Mme : METIDJI.N*

*A mes collègues du master PV sans exception 😊*

*A vous ....*

## Sommaire

Remerciement	i
Dédicaces	ii
Sommaire	iii
Résumé	
Introduction générale	1
<b>Chapitre I</b>	<b>2</b>
<b>Gestion d'énergie dans les systèmes PV</b>	
I.1 Introduction	3
I.2 La consommation énergétique dans le monde	3
I.3 La consommation et la production énergétique en Algérie	5
I.4 La génération de l'énergie renouvelable	7
I.5 L'énergie renouvelable en Algérie	8
I.5.1 Potentiel national en énergie renouvelable	8
I.6 Energie solaire	10
I.6.1 Rayonnement solaire	11
I.7 La conversion photovoltaïque	13
I.8 Le système photovoltaïque	13
I.8.1 Classement des systèmes PV	13
I.8.2 Composantes des systèmes PV	16
I.8.3 Le générateur Photovoltaïque	16
I.8.3.1 Une cellule photovoltaïque	17
a. Le silicium monocristallin	17
b. Le silicium poly cristallin	17
c. Le silicium amorphe	18
I.8.3.2 Orientation et inclinaison des panneaux photovoltaïques	19
I.8.3.3 Les performances du générateur photovoltaïques	20
I.8.3.4 Influence de l'éclairement et température	21
a. Sous un ensoleillement fort (utilisation extérieur)	21
b. Sous éclairage faible (en usage intérieur)	21
I.8.4 Le convertisseur DC/DC	22
I.8.5 L'onduleur	23
I.8.6.1 La MPPT	26
I.9 Gestion d'énergie dans un système PV	27
I.9.1 Gestion de la demande	27
a) Un concept de gestion de l'énergie intelligente : applications Smart socket avec distribution DC	28
b) Le délestage de la charge	29
I.9.1 Organigramme avancé de gestion d'énergie	30
I.10 Conclusion	30

## Chapitre II

### Modélisation et dimensionnement du système

II.1 Introduction	31
II.2 Maison solaire photovoltaïque	31
II.3 Les besoins énergétique de la maison étudiée	32
II.4 Modélisation du système photovoltaïque	38
II.4.1 Modélisation du module photovoltaïque	39
II.4.2 Modélisation d'un convertisseur DC/DC	40
II.4.3 Modélisation du système de stockage	40
II.4.3.1 Modélisation de la charge de la batterie	41
II.4.3.2 Modélisation de la décharge de la batterie	42
II.4.3.3 Modélisation de la surcharge de la batterie	42
II.4.4 Modélisation du convertisseur DC/AC	43
II.4.5 Modélisation du réseau électrique	44
II.4.6 Modélisation théorique de la charge	45
II.5 Méthode de dimensionnement et optimisation d'un système PV	46
II.5.1 Paramètres relatifs au site d'installation	47
a- Paramètres concernant le module PV	47
b- Paramètres concernant la batterie de stockage	47
c- Paramètres concernant le régulateur de charge	47
d- Paramètres concernant le convertisseur DC/AC	48
e- Paramètres concernant la charge	48
II.5.2 Dimensionnement	48
1) Dimensionnement du générateur PV	48
2) Dimensionnement du stockage	50
3) Dimensionnement du régulateur DC/DC	51
a- Tension d'entrée	51
b- Tension de sortie	51
c- Intensité d'entrée	52
d- Intensité de sortie	52
4) Dimensionnement de l'onduleur	52
a- La tension d'entrée	52
b- La tension de sortie	52
c- La puissance nominale	52
d- La puissance maximale	52
e- La forme du signal	53
5) Dimensionnement du câble de connexions	53
a- La liaison électrique panneau-batterie	53
b- Résistance d'un câble électrique	53
c- Réduire les pertes et la chute de tension dans un câble électrique	54
II.6 Application du dimensionnement	55
II.7 Conclusion	57

## **Chapitre III**

### **Résultats de simulation et discussions**

III.1 Introduction	58
III.2 Stratégie de gestion utilisée	58
III.2.1 Stratégie Gestion des charges	58
III.3 Système photovoltaïque connecté au réseau	59
III.3.1 Description du system étudié sous Matlab/Simulink (connecté au réseau)	59
➤ Paramètres du module photovoltaïque	60
➤ Paramètres du convertisseur Boost	62
➤ Paramètres du convertisseur DC/AC	62
➤ Paramètres du réseau électrique	62
III.3.2 Production énergétique du système	62
III.3.2.1 Profils d'irradiation et température	62
III.3.2.2 Profils de production	64
III.3.3 La demande énergétique de la maison	65
1. Fonctionnement des appareils électroménagers utilisés	66
2. Profil de consommation de chaque appareil	67
III.4 Etude comparative	74
III.5 Conclusion	75
Conclusion générale	
Liste des figures	
Nomenclature	
Bibliographie	

## Résumé :

Le but de ce travail est la mise en place d'un programme de gestion d'énergie dans une habitation solaire alimentée par un système PV connecté au réseau électrique.

Dans ce travail, nous avons réalisé des simulations de cette installation en utilisant MATLAB/Simulink dans le but de trouver un meilleur scénario qui permet l'exploitation optimale de l'énergie PV produite tout en assurant le confort de l'utilisateur de cet habitat à moins cout.

Nous avons utilisé des données météorologiques et des profils de consommation réels pour avoir des résultats plus précis.

**Mots clés :** gestion d'énergie, système PV, réseau électrique, profils de consommation

## الملخص:

الهدف من هذه الدراسة يتمثل في وضع برنامج لتسيير الطاقة الكهربائية المستهلكة لمنزل شمسي موصول بالشبكة الكهربائية العامة.

خلال هذا العمل قمنا بإجراء محاكات باستعمال برنامج MATLAB/SIMULINK بهدف إيجاد أفضل سيناريو يسمح بالاستغلال الجيد للطاقة الكهروضوئية مع الحفاظ على راحة المستهلك وبأقل ثمن.

قمنا باعتماد معطيات حقيقية للأحوال الجوية إضافة إلى تقرير استهلاك حقيقي في سبيل الحصول على نتائج أكثر دقة وواقعية.

**الكلمات المفتاحية:** تسيير الطاقة، الشبكة الكهربائية، الطاقة الكهروضوئية.

## Abstract :

This work aims to set up a management program in a solar home powered by On grid- PV system.

In this study, we carried out simulations of the proposed PV system using MATLAB / Simulink in order to find a better scenario, which allows the optimal exploitation of the produced PV energy while ensuring the comfort of the home user with less cost.

We used real weather data and consumption profiles to get results that are more accurate.

**Key Word:** Energy management, Consumption profile, ON grid-PV system

## **Introduction générale**

Aujourd'hui, nous devons admettre que les risques d'impacts négatifs liés aux changements climatiques sont plus élevés que ce qui avait été estimé il y a quelques années.

Le contexte énergétique actuel dicte l'instauration d'une transition énergétique où la part des sources d'énergie fossiles se réduira graduellement au profit de celle des énergies renouvelables et l'enjeu n'est autre que la sauvegarde de la planète contre ces changements climatiques [1].

L'un des secteurs les plus énergivores dans le monde est celui du résidentiel [2], qui est l'objet de mesures énergétiques vigoureuses afin d'impacter de manière significative et durable les bilans énergétiques.

L'habitation étant la brique de base dans ce secteur. Celle qui fait l'objet de nombreuses études visant notamment à réduire sa consommation tout en satisfaisant ses besoins énergétiques par des sources d'énergie renouvelable.

Parmi les moyens de production d'énergie renouvelable, le photovoltaïque (PV) qui apparaît aujourd'hui comme le plus approprié et le plus abouti à la production d'électricité d'origine renouvelable pour l'habitat. Ajoutons à cela la libéralisation du marché de l'électricité qui introduit des changements majeurs dans le domaine de l'énergie. La multiplication des producteurs indépendants et des productions décentralisées.

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est en forte croissance depuis quelques années car c'est une source inépuisable, non polluante pour l'environnement, silencieuse et non dérangeante pour les riverains. Le développement rapide de l'énergie solaire est apparu progressivement sous forme d'installations de petites puissances raccordées au réseau à Basse Tension (BT) et de fermes solaires connectées directement au réseau à Moyenne Tension (HTA) et des installations particulières dans les habitats.

Le but d'une installation PV raccordée au réseau est de satisfaire les besoins énergétiques de tels habitats à tous moments sans avoir le souci de la faible production à cause des conditions météorologiques ou les pannes techniques du système PV, de minimiser la facture d'électricité consommée et de bénéficier comme investissement en injectant l'excès de la production au réseau public.



L'un des défis majeurs auxquels nous nous sommes confrontés est de trouver un équilibre entre la production et la consommation en ayant recours à cette énergie sans sacrifier le confort des usagers

Pour ce faire, nous nous proposons, à travers ce travail, de présenter et traiter le cas concret d'une habitation dotée d'un système photovoltaïque en élaborant une stratégie de gestion d'énergie qui permette d'utiliser de manière optimale sa production d'électricité d'origine photovoltaïque. Cela nécessitera, d'une part, la réduction de la consommation énergétique de cette habitation et, d'autre part, l'adaptation de ses besoins énergétiques à la production photovoltaïque. Plusieurs configurations sont étudiées et traitées en utilisant différents types de profil de consommation.

L'objectif ultime étant d'arriver à satisfaire la demande énergétique de l'utilisateur de cette habitation à moindre coût, ou d'une autre manière, d'assurer l'autoconsommation sans avoir besoin du réseau électrique sauf si nécessaire.

Le présent travail est subdivisé en trois chapitres comme suit :

- Dans le premier chapitre, nous allons commencer par des généralités sur l'énergie produite et consommée dans le monde. Nous allons parler par la suite des différents types des énergies renouvelables et le programme national des EnR, ensuite nous détaillerons le système PV en donnant la description des différentes composantes du système PV, nous terminerons par la présentation des différents travaux qui ont été faites dans le sujet de la gestion d'énergie dans une maison alimentée par un système PV ainsi qu'un organigramme qui résume les étapes à suivre pour faire cette gestion d'énergie.
- Le deuxième chapitre présentera dans sa première partie une configuration de la maison solaire sur laquelle nous allons faire notre étude (Site, superficie ...) et une évaluation de ces besoins énergétiques (Profils de consommation). Dans la seconde partie nous allons faire la modélisation et le dimensionnement du système PV proposé pour alimenter la maison (nombre de panneaux PV, batteries, régulateurs de charge, onduleur ...).
- Le troisième chapitre sera consacré à la simulation du système PV proposé avec la gestion d'énergie pour deux cas différents en été et en printemps en utilisant le logiciel Matlab-Simulink dont le but de montrer les performances de la gestion d'énergie

proposée et nous concluons par une petite étude comparative qui montre la nécessité de cette gestion dans l'habitat solaire.

Nous terminerons notre travail par une conclusion générale dans laquelle nous résumons les différents résultats trouvés et nous donnons les perspectives et les améliorations qui pourraient être prises en compte pour la continuité de ce travail.

# **Chapitre I**

## **Gestion d'énergie dans les systèmes PV**

## I.1. Introduction

Tous les jours, le soleil fournit de l'énergie à la Terre. L'homme peut utiliser cette énergie gratuite grâce à une technologie appelée photovoltaïque, cette dernière transforme l'énergie solaire en électricité.

Les modules ou panneaux photovoltaïques sont composés de semi-conducteurs qui permettent de transformer directement la lumière du soleil en électricité. Ces modules peuvent s'avérer une source d'énergie disponible est sûre, fiable, sans entretien et non polluante qui dure très longtemps. La majorité des modules sur le marché aujourd'hui sont pourvus de garanties de plus de 20 ans, et ils fonctionneront bien au-delà de cette période.

Des millions de systèmes ont été installés dans le monde entier, de puissances différentes allant d'une fraction d'un watt à plusieurs mégawatts. Pour de nombreuses applications, les systèmes solaires électriques sont non seulement rentables, mais ils peuvent aussi représenter l'option la moins coûteuse.

Pour optimiser le rendement de ces systèmes, il faut une bonne gestion d'énergie qui détermine les besoins énergétique et le produit et qui fait l'équilibre entre eux pour minimiser les couts des systèmes PV et diminuer le gaspillage d'énergie.

Ce chapitre aborde des généralités sur l'énergie produite et consommée dans le monde. Ensuite nous allons parler des différents types des énergies renouvelables et le programme national des EnR, après nous détaillerons le système PV en donnant la description des différentes composantes du système PV, à la fin nous présenterons des différents travaux qui ont été mené dans le sujet de la gestion d'énergie dans une maison alimentée par un système PV ainsi qu'un diagramme qui résume les étapes à suivre pour faire cette gestion d'énergie.

## I.2. La consommation énergétique dans le monde

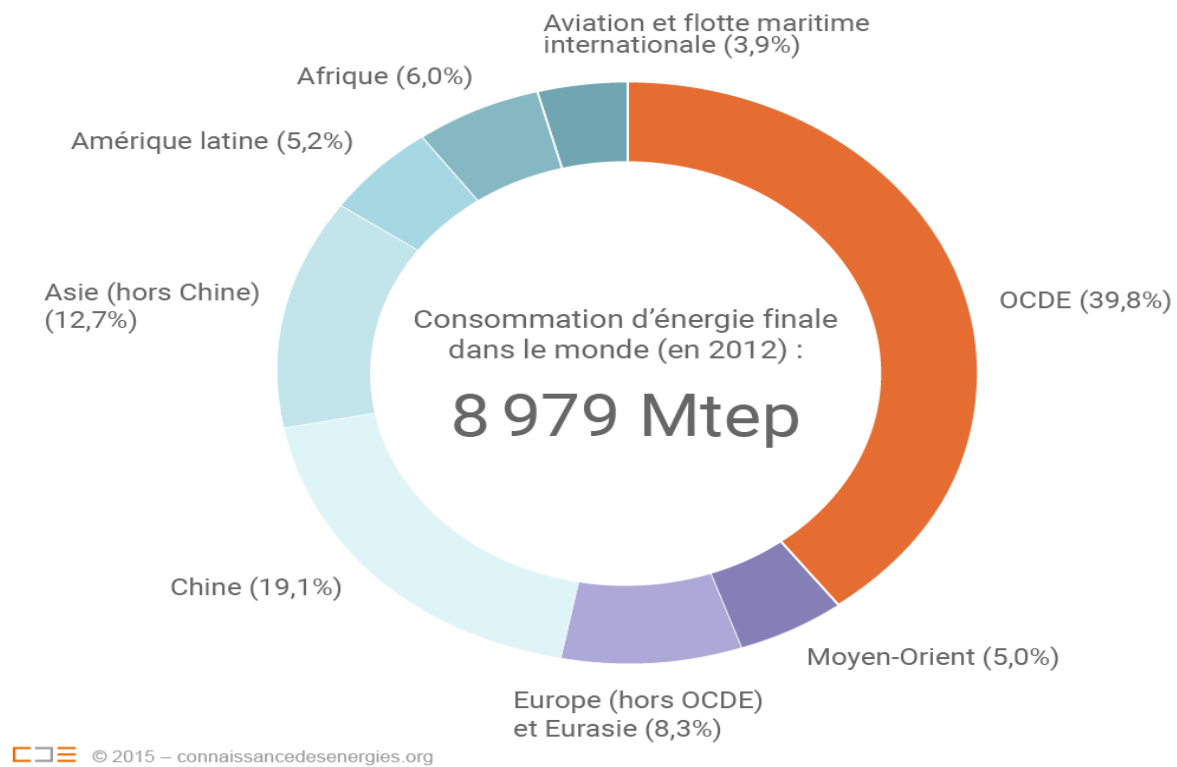
La consommation d'énergie finale est soit une consommation directe d'énergie primaire non transformée, comme le charbon brûlé sous les chaudières industrielles dans la chimie ou injecté dans les fours des cimenteries, ou bien une consommation d'énergie secondaire comme l'essence ou l'électricité.

- **Consommation d'énergie primaire et finale**

En résumé, la consommation d'énergie finale est égale à la consommation d'énergie primaire moins toutes les pertes d'énergie au long de la chaîne industrielle qui transforme les ressources énergétiques en énergies utilisées dans la consommation finale comme par exemple :

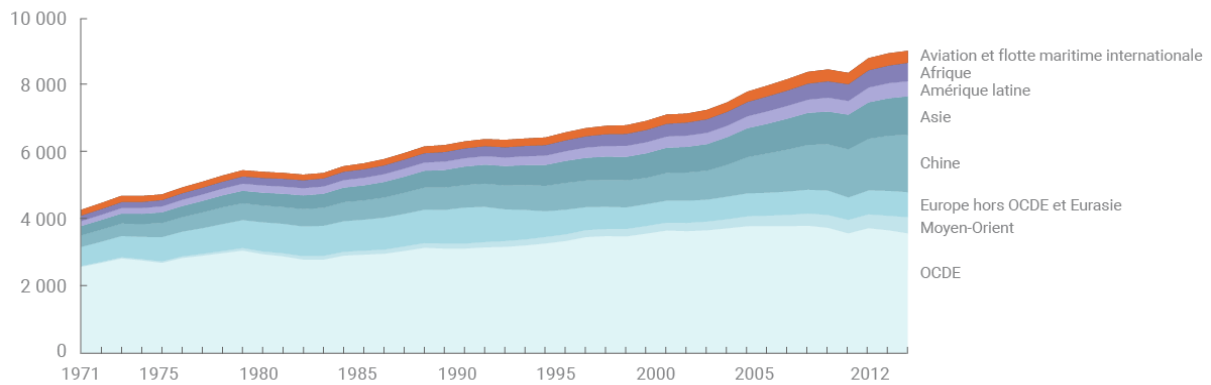
- La consommation d'essence dans un moteur de voiture et la consommation de gaz dans le processus de production des métaux sont comptés dans la consommation finale. Contrairement la consommation de charbon utilisé dans les centrales électriques qui ne l'est pas, c'est l'électricité produite par les centrales qui l'est.

A l'échelle mondiale, on assiste à une transformation de plus en plus poussée de l'énergie avant sa consommation finale, puisque la part de l'électricité, énergie secondaire, progresse dans la consommation finale.



**Figure I.1 :** La consommation d'énergie finale dans le monde en 2012 avoisine 9 milliards de tonnes d'équivalent pétrole (d'après Key World Energy Statistics 2014, AIE)

Entre 1973 et 2012, la consommation d'énergie dans le monde a presque doublé (+ 92%) [2].



**Figure I.2 :** L'évolution de la consommation dans le monde [2].

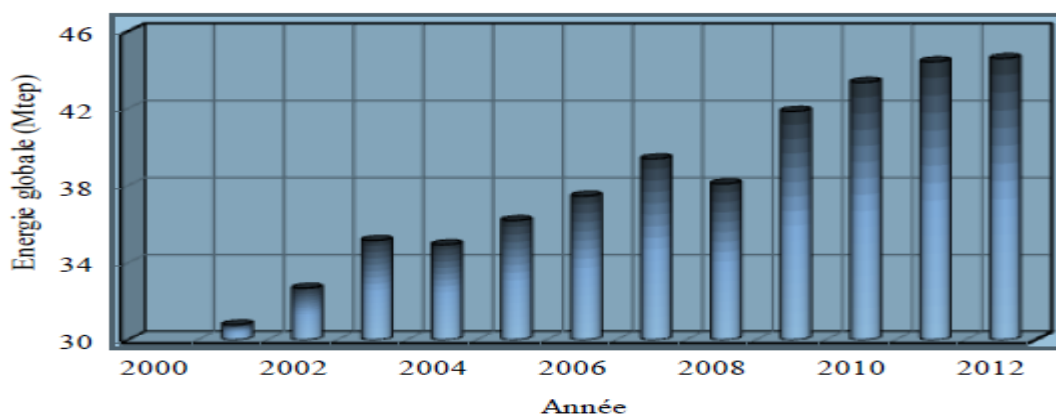
Cette évolution est la combinaison de la stagnation depuis 10 ans de la consommation des pays anciennement industrialisés, représentés par le groupe des pays de l'OCDE, et des nouvelles économies qui sont en forte croissance.

La Chine, exemple des nouveaux pays industrialisés, a vu sa consommation d'énergie plus que tripler de 1990 à 2008. Sa part dans la consommation mondiale a doublé et est passée de 7,5% à 16,4 %. La consommation par habitant en Chine est maintenant égale à la consommation par habitant dans le monde.

La consommation de l'Afrique a augmenté de 50% de 1990 à 2008, mais est restée marginale dans la consommation mondiale (environ 5,7% pour plus de 15% de la population mondiale).

### I.3. La consommation et la production énergétique en Algérie

La figure I.3 montre l'évolution de l'énergie globale consommée en Algérie, elle représente la somme des consommations finales, comme par exemple l'électricité, le gaz pour le chauffage et autre divers



**Figure I.3 :** Consommation énergétique globale annuelle en Algérie [3]

La croissance de la consommation énergétique globale en Algérie a atteint un taux annuel moyen de 4.39 % entre 2001 et 2010. la part de la consommation en énergie solaire est estimée à 200 GWh en 2012.

Durant la dernière décennie, cette croissance a été pratiquement stable autour d'un taux annuel moyen de 6 %. La figure I.5 montre l'évolution de la production de l'électricité en Algérie avec ces différentes filières (renouvelable et non renouvelable) entre 1995 et 2012.

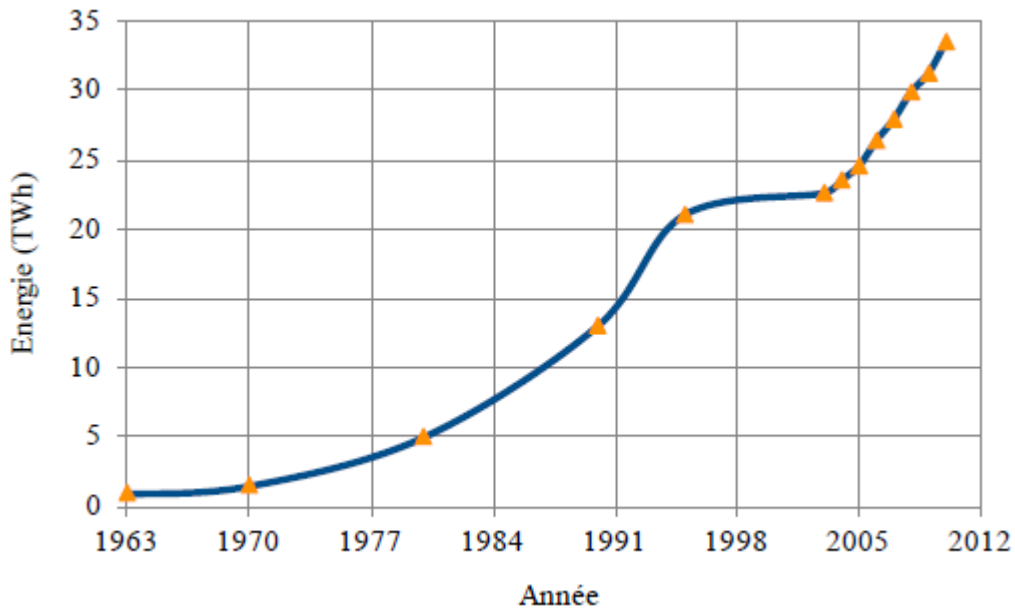


Figure I.4 : évolution de la consommation de l'énergie électrique en Algérie [3]

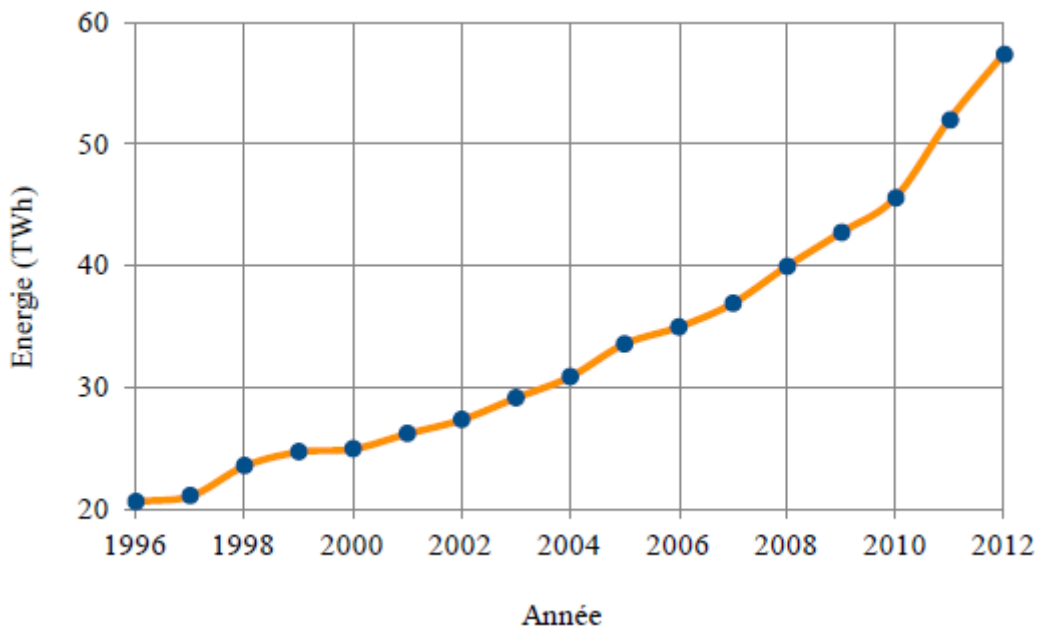


Figure I.5 : évolution de la production électrique en Algérie [3]

#### I.4. La génération de l'énergie renouvelable

Les énergies nouvelles, ou énergies renouvelables, ne constituent pas une idée neuve, bien qu'elles fassent l'objet d'un engouement croissant dans le contexte de la transition énergétique. Le soleil, le vent, la chaleur de la terre, l'eau ou encore la croissance des végétaux ont toujours été exploitées par l'homme [2] :

- **l'énergie solaire** : dans l'Antiquité, la concentration de rayons solaires à l'aide de miroirs en bronze permet déjà de chauffer des fours à haute température. L'effet photovoltaïque, consistant à convertir la lumière en électricité, a été découvert dès 1839 par Becquerel ;
- **l'énergie éolienne** : elle est également exploitée dès l'Antiquité par des bateaux à voile et des moulins à vent pour la meunerie<sup>(1)</sup> et l'irrigation ;
- **la biomasse** : elle est utilisée par l'homme depuis la Préhistoire (combustion des végétaux), dès qu'il acquiert la maîtrise du feu pour se chauffer, cuire sa nourriture et s'éclairer ;
- **La géothermie** : les premières traces d'utilisation de cette énergie datent de près de 20 000 ans. La pratique des bains thermaux se développe avec l'apparition de la civilisation ;
- **l'énergie hydraulique** : la force de l'eau est utilisée depuis plus de 2 000 ans avec les moulins et les bateaux à aubes. Les roues sont utilisées à partir du XIX<sup>e</sup> siècle pour produire de l'électricité (hydroélectricité appelée « houille blanche »).

Sous Vauban (fin XVII<sup>e</sup>), on dénombrait ainsi 65 000 moulins à eau, 15 000 usines hydrauliques et 16 000 moulins à vent. La révolution industrielle au XIX<sup>e</sup> siècle a marqué un déclin des énergies renouvelables au profit des énergies fossiles.

A défaut d'être « nouvelles » historiquement, ces énergies peuvent être considérées comme telles d'un point de vue technologique.

De nombreux facteurs favorisent l'utilisation des énergies renouvelables, parmi eux, on peut citer :



L'exploitation des énergies renouvelables génère peu de polluants (déchets et émissions). Les EnR sont notamment un vecteur privilégié de la lutte contre le réchauffement climatique.

Parmi les énergies renouvelables, trois grandes familles émergent :

- L'énergie d'origine mécanique (la houle, éolien)
- L'énergie électrique (panneaux photovoltaïques)
- L'énergie sous forme de la chaleur (géothermie, solaire thermique,...)

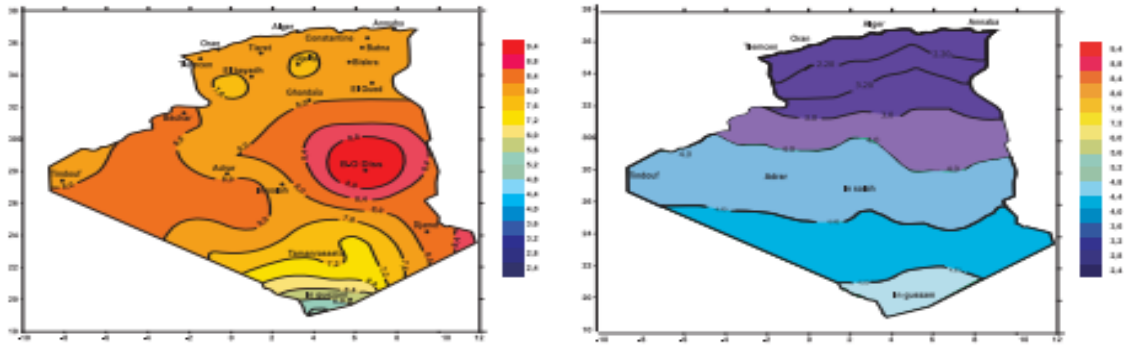
En sachant qu'à l'origine de toutes ces énergies est l'énergie en provenance du soleil transformée ensuite par l'environnement terrestre.

### **I.5. L'énergie renouvelable en Algérie [4]**

A l'instar de la majorité des pays dans le monde, l'Algérie a signé le protocole de Kyoto et s'est donc engagé à apporter sa contribution pour la sauvegarde de la planète en réduisant ses rejets de gaz à effet de serre mais aussi à préserver ses ressources naturelles pour les générations futures [4]. L'Algérie a clairement montré sa volonté politique pour la diversification des sources d'énergie notamment en lançant, en 2011 par le biais du Ministère de l'Énergie et des Mines (MEM) un ambitieux programme de développement des énergies renouvelables (ER) et de l'efficacité énergétique [4].

#### **I.5.1. Potentiel national en énergie renouvelable**

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose de l'un des gisements solaires les plus importants au monde (Figure I.6). La durée d'ensoleillement sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de  $1\text{m}^2$  est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de  $1700\text{ kWh/m}^2/\text{an}$  au Nord et  $2263\text{ kWh/m}^2/\text{an}$  au Sud du pays. Ce gisement solaire dépasse les 5 milliards de GWh par an (Tableau I.1).



**Figure I.6 :** Irradiations globales journalière reçues en Algérie sur un plan horizontal pour les mois de juillet (a) et décembre (b) [4].

Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
<b>Superficie (%)</b>	4	10	86
<b>Durée Moyenne d'Ensoleillement (Heures/an)</b>	2650	3000	3500
<b>Energie Moyenne Reçue (kWh/m2/an)</b>	1700	1900	2650

**Tableau I.1 :** Potentiel solaire en Algérie [4].

En effet, l'intégration des énergies renouvelables dans le mix énergétique national constitue un enjeu majeur dans la perspective de préservation des ressources fossiles, de diversification des filières de production de l'électricité et de contribution au développement durable.

Dans le cadre du programme de développement des énergies renouvelables 2011-2030 adopté par le Gouvernement en février 2011, les énergies renouvelables se placent au cœur des politiques énergétique et économique menées par l'Algérie. Ce programme a connu une première phase consacrée à la réalisation de projets pilotes et de tests des différentes technologies disponibles, durant laquelle des éléments pertinents concernant les évolutions technologiques des filières considérées sont apparus sur la scène énergétique et ont conduit à la révision de ce programme. [5]

La répartition de ce programme par filière technologique, se présente comme suit [6] :

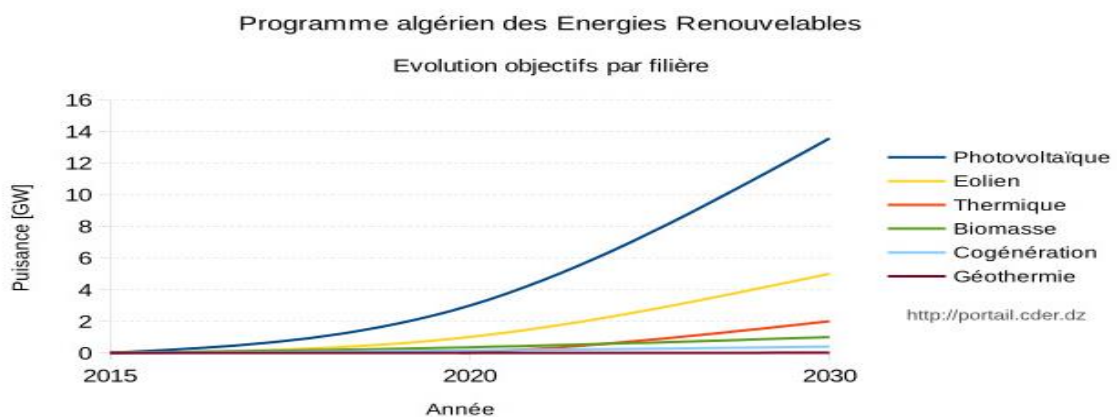
- ▶ Solaire Photovoltaïque : 13 575 MW
- ▶ Eolien : 5010 MW
- ▶ Solaire thermique : 2000 MW

- ▶ Biomasse : 1 000 MW
- ▶ Cogénération : 400 MW
- ▶ Géothermie : 15 MW

La réalisation du programme permettra d'atteindre à l'horizon 2030 une part de renouvelables de près de 27% dans le bilan national de production d'électricité. Le programme de développement des énergies renouvelables se présente comme suit :

	1ère phase 2015-2020 [MW]	2ème phase 2021-2030 [MW]	TOTAL [MW]
Photovoltaïque	3000	10575	13575
Eolien	1010	4000	5010
CSP	-	2000	2000
Cogénération	150	250	400
Biomasse	360	640	1000
Géothermie	05	10	15
TOTAL	4525	17475	22000

**Tableau I.2** Le programme de développement des énergies renouvelables [4]



**Figure 1.7 :** Programme algérien des EnR [4]

## I.6. Energie solaire

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante. La quantité d'énergie libérée par le soleil et captée par la planète terre pendant une heure et pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un

an. Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 Watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre pour une distance moyenne terre-soleil de 150 Millions de km, c'est ce que l'on appelle la constante solaire qui est égale à  $1367\text{W/m}^2$ . La partie d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Celle-ci est caractérisée par le nombre de masse d'air (AM) [6]. Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi sous un ciel clair est de  $1000\text{ W/m}^2$  et est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air. Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, plus d'énergie est perdue. Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de temps, la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à  $1000\text{ W/m}^2$ . [7]

### **I.6.1. Rayonnement solaire**

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde d'un faisceau lumineux caractérise sa couleur, telle que la perçoit notre oeil. Bien sûr, tous les rayonnements ne sont pas perceptibles par l'oeil, mais ils ont aussi leur longueur d'onde, qui dépend de leur fréquence : fréquences radio, microondes...

Si on regarde de quoi se compose le rayonnement du soleil parvenant à la surface de la terre on trouve l'infrarouge qui procure de la chaleur, le visible qui est nécessaire à la croissance des plantes et des animaux, et l'ultraviolet qui brunit la peau et tue les bactéries. Le spectre du soleil s'étend de 200 nm à 3  $\mu\text{m}$ .

Les physiciens du siècle dernier ont nommés «ultraviolette» la lumière plus bleue que le bleu violet perceptible par l'oeil, et «infrarouge» la lumière moins rouge que celle que notre oeil détecte. En effet, la perception oculaire moyenne de l'homme s'étend du bleu de longueur d'onde 380 nm au rouge de longueur d'onde 780 nm, en passant par les couleurs que l'arc-en-ciel nous dévoile lorsque les gouttes de pluie décomposent la lumière blanche. On appelle spectre ou répartition spectacle, d'une source de lumière, l'ensemble des couleurs ou longueurs d'onde qui la constituent.

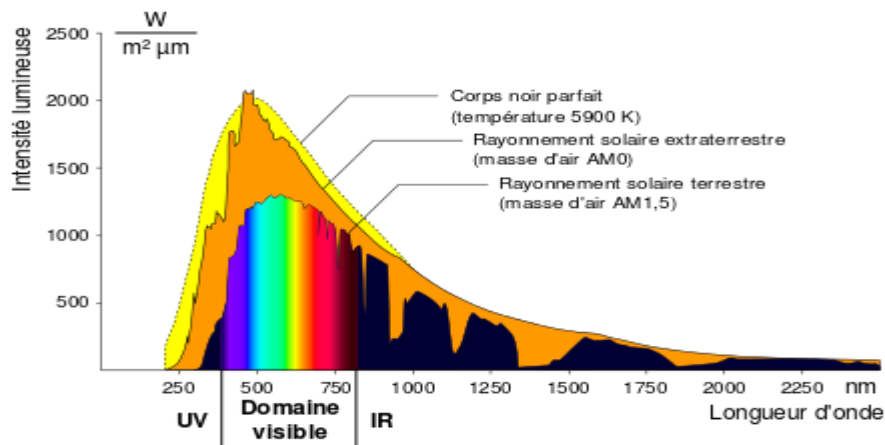


Figure I.8 : Analyse spectrale du rayonnement solaire.[7]

Les types de rayonnement solaires :

- **Rayonnement Directe** : Rayonnement reçu directement à partir du soleil il peut être mesuré par un pyrhéliomètre.
- **Rayonnement diffus** : rayonnement provenant de toute la voûte céleste. Ce rayonnement est due à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages. Il peut être mesuré par un pyromètre avec écran masquant le soleil.
- **Rayonnement solaire réfléchi ou l'albédo du sol** : le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).
- **Rayonnement global** : la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyranomètre ou un solarimètre sans écran.

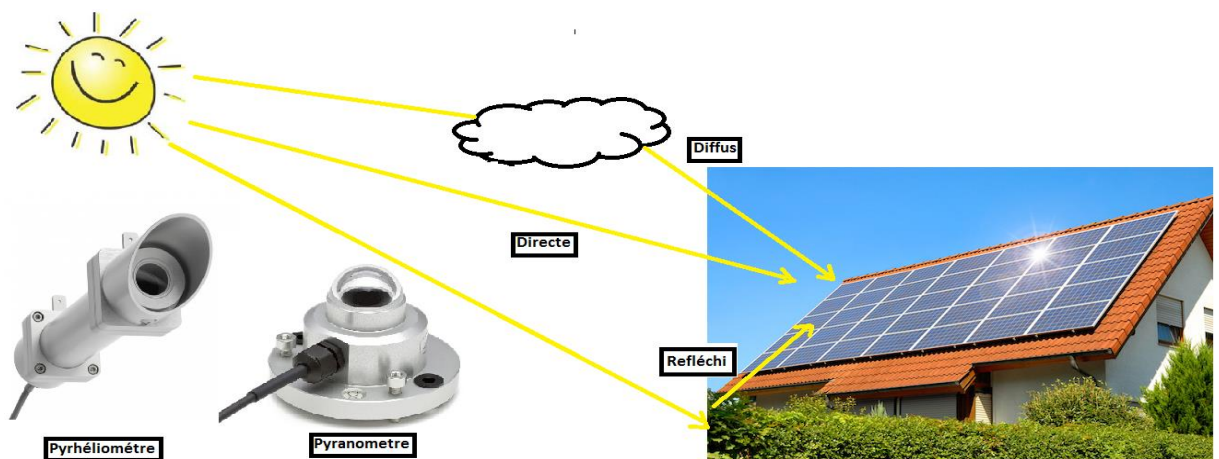


Figure I.9 : Rayonnement solaire et leurs appareils de mesures

## I.7. La conversion Photovoltaïque

La conversion photovoltaïque se produit dans des matériaux semi-conducteurs, mais pour comprendre le principe de cette conversion les notions de la photoconductivité d'un semi-conducteur sont nécessaires. Rappelons tout d'abord les deux points suivants :

- Toute matière est faite d'atomes comportant des électrons (charges négatives élémentaires) qui gravitent autour d'un noyau.
- Un courant électrique est une circulation d'électrons.

Dans un isolant électrique, les électrons de la matière sont liés aux atomes et ne peuvent pas se déplacer.

Dans un conducteur électrique, les électrons sont totalement libres de circuler et permettent le passage d'un courant. Par contre dans un semi-conducteur, la situation est intermédiaire : les électrons contenus dans la matière ne peuvent circuler que si on leur apporte une énergie pour les libérer de leurs atomes. Quand la lumière pénètre dans un semi-conducteur, ses photons apportent une énergie permettant aux électrons de se libérer et de se déplacer dans la matière, il y a donc courant électrique sous exposition à la lumière.

Le semi-conducteur le plus utilisé est disponible en quantité incalculable à la surface de la terre, puisque présent dans le sable sous forme de silice et de silicates : il s'agit du silicium (Si). C'est ce silicium qui compose les circuits intégrés, à l'origine de l'expansion considérable de l'électronique moderne.

Un photo-générateur est donc physiquement une tranche de silicium que l'on prend en sandwich entre deux électrodes métalliques (+) et (-) pour collecter le courant produit.

Mais pour «attirer» ces électrons vers les électrodes, il faut une force interne dite différence de potentiel entre les bornes du photo-générateur qui permet la circulation du courant. Et c'est le «dopage» des parties avant et arrière de la «tranche» de silicium qui va permettre l'apparition de cette différence de potentiel :

- Dopage de type « p » sur une face, par adjonction d'atomes de bore (B), contenant moins d'électrons périphériques par atome que le silicium,
- Dopage de type « n » sur l'autre face, par adjonction d'atomes de phosphore (P), contenant plus d'électrons périphériques par atome que le silicium.

On obtient ainsi une «jonction» possédant un champ électrique interne pour entraîner vers le circuit extérieur les charges électriques libérées sous illumination. D'un point de vue

électronique, un photo-générateur est donc une jonction p-n ou p-i-n (parfois, on ajoute une couche intrinsèque, c'est à dire non dopée entre la couche p et la couche n) réalisée dans un semi-conducteur absorbant dans le spectre visible.

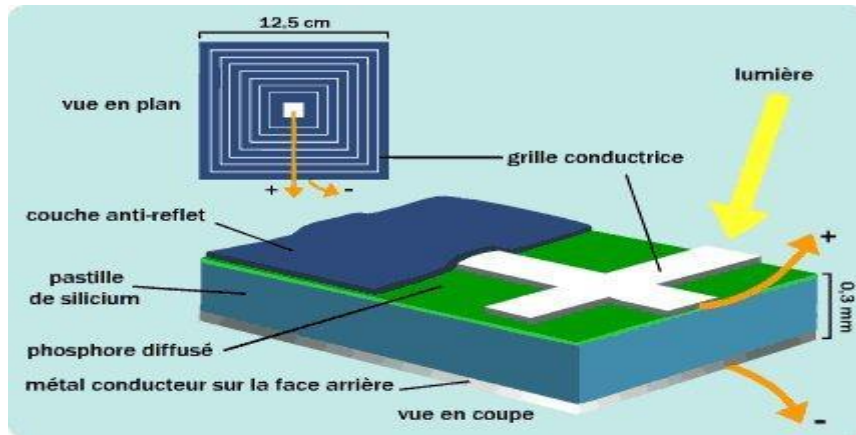


Figure I.10 : Description d'une photopile ou cellule photovoltaïque.

## 1.8. Le système photovoltaïque

### I.8.1. Classement des systèmes PV

Les systèmes PV sont classés en fonction de trois types : autonomes, hybrides et reliés au réseau. Le type que vous choisissez dépendra de vos besoins, de votre emplacement et de votre budget.

- **Les systèmes autonomes** : sont complètement indépendants d'autres sources d'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons, les chalets ou les camps dans les régions éloignées ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau. Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries d'accumulateurs pour stocker l'énergie. De tels systèmes sont particulièrement utiles et rentables dans les applications estivales, lorsque l'accès à un endroit est difficile ou coûteux ou lorsque les besoins en entretien doivent être réduits au minimum.



Figure 1.11 : Système PV autonome

- **Les systèmes hybrides** : reçoivent une partie de leur énergie d'une ou de plusieurs sources supplémentaires. En pratique, les modules de systèmes PV sont souvent alliés à une éolienne ou à une génératrice à combustible. De tels systèmes ont habituellement des accumulateurs de stockage d'énergie. Ils conviennent mieux lorsque la demande d'énergie est élevée (pendant l'hiver ou tout au long de l'année), lorsque l'énergie doit être fournie sur demande ou si votre budget est limité.



Figure 1.12 : Système PV hybride

- **Les systèmes PV raccordés au réseau** : permettent de réduire la consommation d'électricité provenant du service public et, dans certains cas, de lui renvoyer l'énergie excédentaire. Dans certains cas, le service public pourrait vous créditer l'énergie retournée au réseau. Étant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même, les accumulateurs ne sont pas nécessaires à moins que vous ne vouliez une forme autonome d'énergie pendant les pannes d'électricité. Ces systèmes sont utilisés dans les immeubles, les domiciles ou les chalets déjà reliés au réseau électrique.

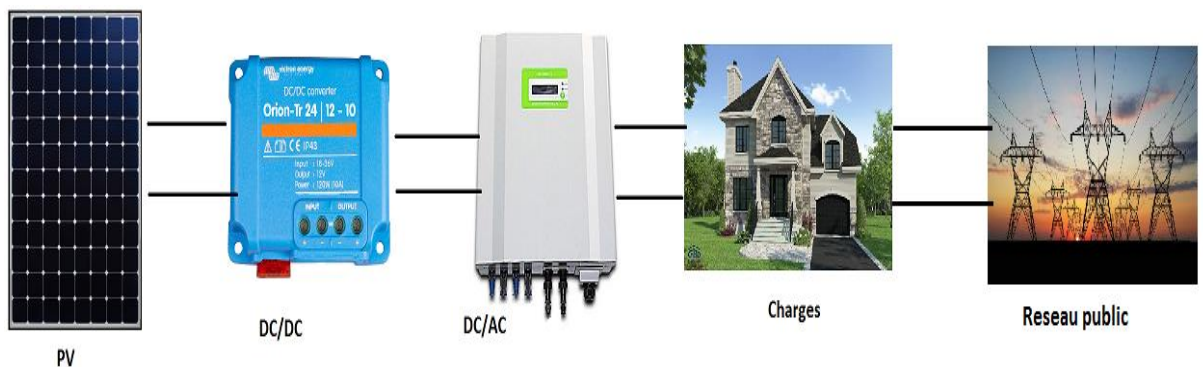


Figure 1.13 : Système PV raccordé au réseau



### **I.8.2. Composantes des systèmes PV**

Un système photovoltaïque (PV), qui est un système de 'production' d'énergie électrique, est constitué principalement d'un générateur photovoltaïque composé d'un seul ou plusieurs modules photovoltaïques, des batteries pour le stockage d'énergie électrique, indispensable pour des systèmes PV autonomes, d'un ou plusieurs convertisseurs continu-continu pour fournir les tensions d'alimentation adéquates pour les batteries et les charges continues et un convertisseur continu-alternatif pour l'alimentation des appareils à courant alternatif (Figure I.11).

L'étude des performances d'un système photovoltaïque en tenant compte des variations, entre autres, des paramètres environnementaux tels que l'éclairement et la température, nécessite l'utilisation d'un outil de simulation. Ce dernier est basé principalement sur des modèles électriques de chacun des blocs du système PV. Nous décrivons dans ce qui suit chacun des étages en précisant sa fonction et en présentant le modèle sur lequel nous nous appuyons pour le simuler.

### **I.8.3. Le générateur Photovoltaïque**

Un générateur photovoltaïque ou module PV c'est l'ensemble des cellules montées en séries et en parallèles pour avoir des puissances supérieures.

Les modules peuvent être amenés à travailler en récepteur. Pour remédier à ces problèmes, des diodes sont placées en série et parallèle avec les modules.

Pour empêcher la batterie de se décharger la nuit dans les cellules PV ou pour empêcher une série de module contenant un module défaillant ou masqué de devenir récepteur du courant fourni par les autres branches de modules, qui ont alors une tension plus élevée, une diode série est intégrée dans chaque branche. On l'appelle diode anti-retour et elle est située en série avec les modules.

Au sein d'une série de modules, un module qui ne peut plus produire d'énergie (masqué, défaillance), doit être protégé pour ne pas devenir récepteur et s'endommager irrémédiablement, des diodes sont donc placées en parallèle avec chacun des modules du générateur. Elles permettent de dévier le courant produit par autres modules de la série.

### I.8.3.1. Une cellule Photovoltaïque

On appelle cellule solaire un convertisseur qui permet la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. La photopile ou cellule solaire est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque.

Selon la technologie employée, ce silicium cristallin peut être :

**a. Le silicium monocristallin :** Les cellules sont formées d'un seul cristal ordonné. Ce Matériau est fabriqué en barreaux étirés à partir d'un germe, ou recristallisés à haute température. C'est le plus cher par rapport aux autres types de cellules.

- Rendement électrique des panneaux : 15 % STC.
- Puissance des panneaux : 5 à 150 W<sub>c</sub>.
- Gamme d'éclairement : 100 à 1000 W/m<sup>2</sup>.
- Usage : tous usages en extérieur de forte et moyenne puissance (télécoms, balisage, relais, habitat...).

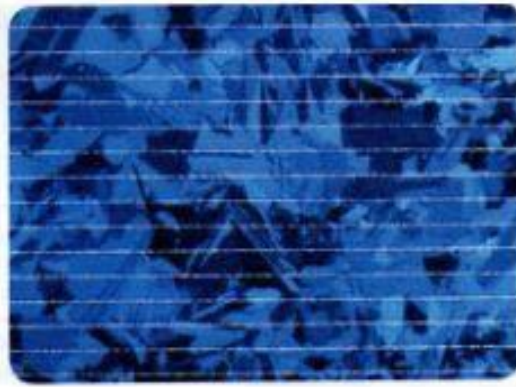


**Figure I.14 :** Cellule au Silicium Monocristallin.

**b. Le silicium poly cristallin :** il est constitué de cristaux assemblés, appelés «grains».

Ce matériau, moins onéreux, est élaboré dans de grands creusets industriels par fonte et refroidissement de blocs de silicium purifié.

- Rendement électrique des panneaux : 12-14 % STC.
- Puissance des panneaux : 5 à 150 W<sub>c</sub>.
- Gamme d'éclairement : 200 à 1000 W/m<sup>2</sup>.
- Usage identique à celui du silicium cristallin.



**Figure I.15 :** Cellule au Silicium Poly cristallin.

**c. Le silicium amorphe :** Nettement moins puissant au soleil que les deux précédents, ce silicium en couche très mince répond par contre à tous les éclairagements, extérieur et intérieur. Sa technologie de fabrication est théoriquement moins onéreuse (mais la production n'a pas atteint des niveaux comparables) et permet de réaliser des petits formats, grâce à la mise en série intégrée et la simplicité de découpe.

- Rendement électrique des panneaux : 5-7 % STC (jusqu'à 9 % pour les «multi jonctions »).
- Puissance des photopiles intérieures : 0 à 1 W<sub>c</sub>.
- Puissance des panneaux extérieurs : 0,5 à 60 W<sub>c</sub>.
- Gamme d'éclairément : 20 lux (en intérieur) à 1000 W/m<sup>2</sup> (en extérieur).
- Usage : électronique professionnelle et grand public (montres, calculettes...), électronique de faible consommation en extérieur, baies vitrées semi transparentes.

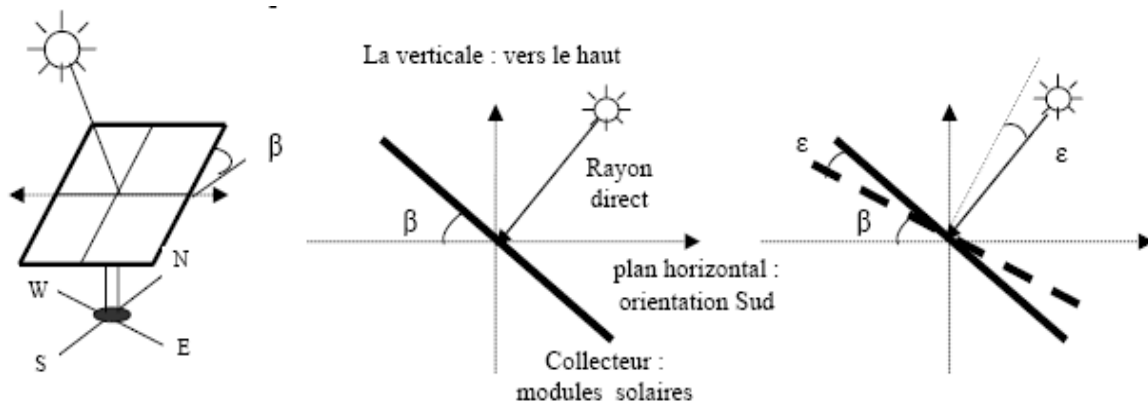


**Figure I.16 :** Cellule au Silicium amorphe (couche mince).

### I.8.3.2. Orientation et inclinaison des panneaux photovoltaïques

La question qui vient immédiatement à l'esprit est : comment placer les panneaux Solaires pour récupérer un maximum de rayonnement solaire et comment savoir quelle Énergie on va récupérer ?

Pour installer un panneau solaire on doit se préoccuper à la fois de l'orientation et de l'inclinaison (voir figure I.17). L'orientation indique tout simplement vers quel point cardinal un panneau est exposé : il peut faire face au Sud, au Nord, à l'Est, à l'Ouest... tout comme la façade d'une maison. L'inclinaison, quant à elle, est l'angle que fait le panneau avec le plan horizontal [9].



**Figure I.17 :** Inclinaison et orientation d'un panneau solaire

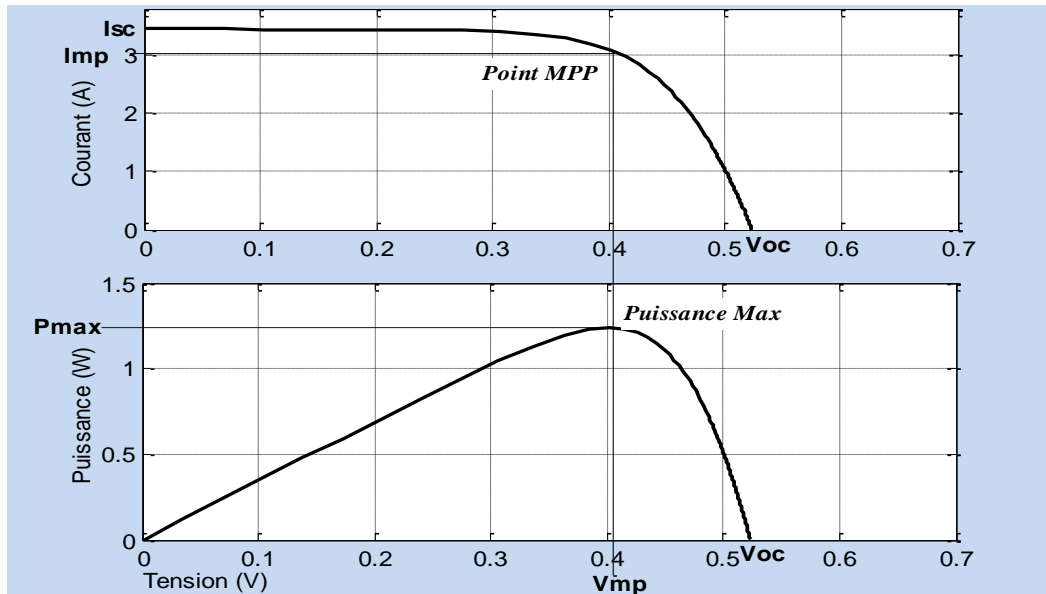
Etant donné que la position du soleil dans le ciel varie constamment, il faudrait idéalement que le panneau suive le soleil. Il existe de tels dispositifs «suiveurs», mais ils consomment une part de l'énergie et sont souvent assez onéreux (pour supporter tous les climats) et nécessitent de l'entretien. Ils sont surtout justifiés pour de gros systèmes avec concentration et pour des rayonnements directs uniquement. En pratique, l'inclinaison optimale pour une utilisation annuelle, est déterminée par la règle suivante :

Inclinaison optimale pour une utilisation annuelle = Latitude du lieu +  $10^\circ$

Cet emplacement idéal se justifie, encore une fois, surtout pour les rayonnements directs et les panneaux qui convertissent le mieux ce rayonnement, en l'occurrence les panneaux au silicium cristallin. Les panneaux au silicium amorphe, quant à eux, convertissent très bien le rayonnement diffus, et pourront être placés par exemple à l'horizontale sans perdre trop d'énergie solaire dans les climats où il y a beaucoup de rayonnement diffus.

### I.8.3.3. Les performances du générateur photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est caractérisée par ses courbes I-V et P-V comme celles représentées par la figure I.18. [10]



**Figure I.18 :** Caractéristiques I-V et P-V d'une cellule photovoltaïque dans des conditions standards (un éclairage de  $1000\text{W/m}^2$  et une température de 25

Les différents paramètres apparaissant sur la figure sont définis dans ce qui suit :

- A. Courant de court-circuit  $I_{sc}$ , c'est le courant maximal généré par la cellule, il est produit lorsqu'elle est soumise à un court-circuit ( $V = 0$ ), puisque  $R_s \ll R_p$  on peut supposer que

$$I_{sc} \approx I_{ph} .$$

- B. Tension en circuit ouvert  $V_{oc}$ , c'est la tension aux bornes de la cellule sans charge où le courant généré  $I = 0$ , elle reflète la tension de seuil de la jonction PN.

- C. Point de puissance maximale, c'est le point de fonctionnement ( $V_{mp}$ ,  $I_{mp}$ ) où la cellule solaire génère sa puissance maximale  $P_{max} = V_{mp} \cdot I_{mp}$ .

- D. Facteur de remplissage  $FF$  (Fill Factor), il correspond au rapport de puissance maximale

sur le produit de  $V_{oc}$  et  $I_{sc}$ , 
$$FF = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}}$$
 il reflète la qualité de la cellule par rapport à une cellule idéale ( $FF = 1$ ).

E. Le rendement de la cellule  $\eta$ , c'est le rapport de conversion de l'énergie lumineuse vers l'énergie électrique, il est égale au rapport de la puissance maximale de sortie sur la puissance des radiations lumineuses (équation I.0).

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{in}} = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{P_{in}} = \frac{V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF}{P_{in}} \quad (I.0)$$

Une cellule PV ne peut délivrer, au maximum, que quelques watts, il est de ce fait indispensable, pour satisfaire les besoins des applications domestiques ou industrielles, d'assembler plusieurs cellules en série ou/et parallèle sous forme de module ou de panneau photovoltaïque. La connexion en série des cellules permet d'augmenter la tension de l'ensemble, tandis que la mise en parallèle permet d'accroître le courant. Le câblage série/parallèle est donc utilisé pour obtenir globalement un générateur PV aux caractéristiques (puissance, courant de court-circuit, tension en circuit ouvert, ..) souhaitées.

#### I.8.3.4. Influence de l'éclairement et de la température

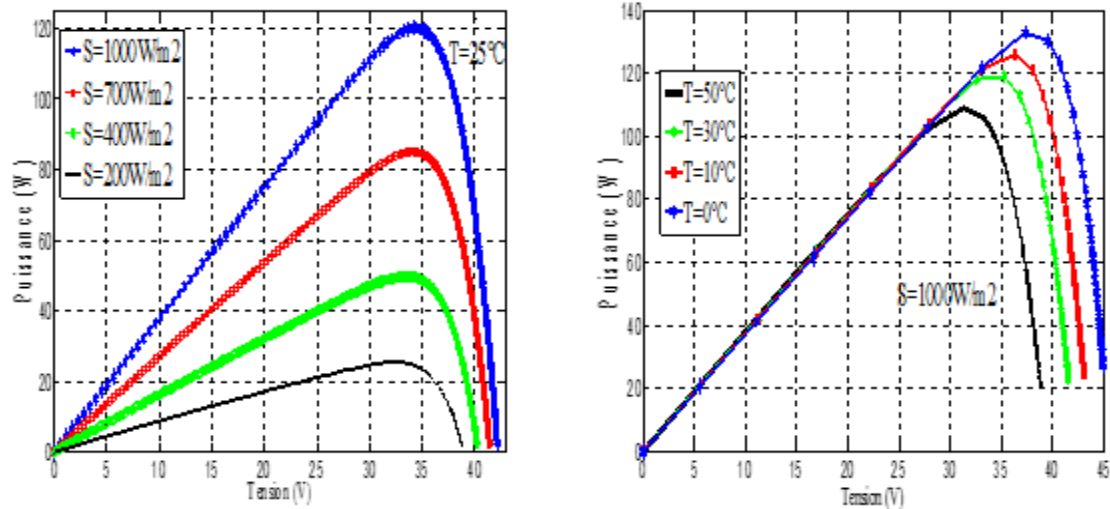
##### a) Sous un ensoleillement fort (utilisation en extérieur)

Le courant  $I_{cc}$  varie directement avec le rayonnement lumineux (la relation est proportionnelle), la tension restant relativement constante. Cela est intéressant, notamment pour la charge d'une batterie. La température a également une influence non négligeable sur les caractéristiques d'un panneau solaire : quand la température s'élève, la tension diminue et donc la puissance aussi.

##### b) Sous éclairage faible (en usage intérieur)

Quand l'éclairement est plus faible que 100 W/m<sup>2</sup>, à environ 10000 lux et a fortiori à l'intérieur des locaux, la tension de la photopile évolue à son tour. Elle baisse avec l'éclairement, il s'agit en fait d'une variation logarithmique de  $U_{co}$  en fonction de l'éclairement. Les photopiles au silicium amorphe sont les seules à permettre un fonctionnement dans ces situations, grâce à une tension encore assez élevée.

C'est grâce à cette caractéristique que le silicium amorphe peut être utilisé sous éclairage artificiel (notamment en dessous de 1000 lux), contrairement au silicium cristallin.



**Figure 1.19.** Les caractéristiques P-V d'un module PV (BP-MSX-120), (a) : en fonction de Différents éclairements à  $T=25^{\circ}\text{C}$ , (b) : en fonction de différentes températures à  $S=1000\text{W}/\text{m}^2$

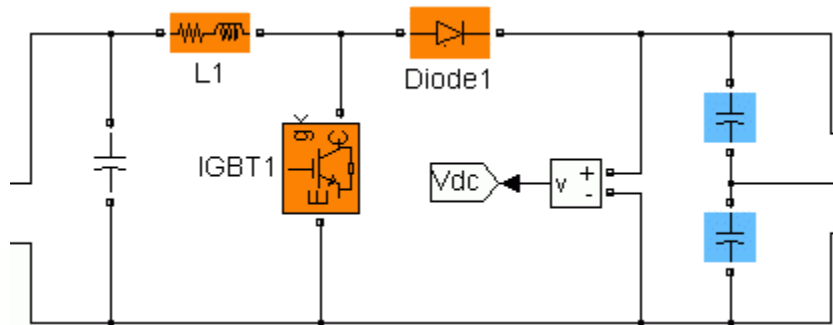
- ✓ La caractéristique puissance-tension dépend directement du rayonnement incident. Quand on double l'éclairement, le courant de court-circuit double aussi. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions. Ceci implique que la puissance optimale de la cellule ( $P_M$ ) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement et les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension (figure I.19).
- ✓ La production d'un module photovoltaïque dépend aussi de la température des cellules. Plus la température augmente, plus le rendement diminue. Une augmentation de la température entraîne une chute importante de la tension, une légère augmentation du courant et globalement une perte non négligeable de puissance (figure 1.19).

#### I.8.4. Les convertisseurs DC/DC

Le hacheur ou *convertisseur continu - continu* est un dispositif de l'électronique de puissance mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs électroniques commandés ce qui permet de modifier la valeur de la tension (moyenne) d'une source de tension continue avec un rendement élevé.

Il existe différents types de hacheur : Si la tension délivrée en sortie est inférieure à la tension appliquée en entrée, le hacheur est dit dévolteur, abaisseur ou Buck. Dans le cas contraire, il est dit survolteur (ou élévateur ou Boost) ainsi qu'un hacheur qui joue les rôles précédents, il est dit (Buck-Boost).

La figure I.20 montre un hacheur Boost sous Matlab Simulink.

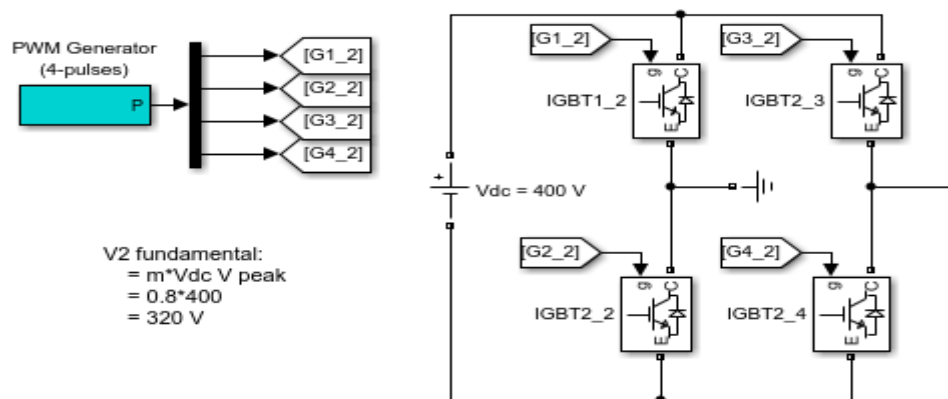


**Figure I.20 :** Hacheur Boost (modèle du Matlab-Simulink)

### I.8.5. L'onduleur

Les onduleurs sont utilisés pour convertir le courant continu en courant alternatif dans les systèmes photovoltaïques.

Les types d'onduleurs produisent une "qualité" d'électricité différente. Donc, l'utilisateur doit correspondre la qualité d'alimentation requise par ses charges avec la qualité d'alimentation produite par l'onduleur. Il existe des divergences majeures entre la génération d'énergie avec les modules photovoltaïques et les exigences du réseau public. Son travail consiste à les relier. L'onduleur le plus simple peut être présenté dans la figure I.21.



**Figure I.21 :** onduleur (modèle de Matlab / Simulink)

### I.8.5. Stockage de l'énergie

Les cellules PV, comme on l'a vu, ne produisent de l'énergie que s'ils sont exposés à la lumière et le courant produit dépend de la valeur de l'éclairement.

-S'il y a concordance entre la présence de la lumière et le besoin d'énergie, il n'est pas nécessaire de la stocker (exemples : une calculatrice, un ventilateur...).



-Si l'on stocke l'énergie sous une autre forme, on peut également se passer du stockage électrique (exemple : une pompe alimentée par énergie solaire stocke l'eau dans un réservoir : la pompe fonctionnera à débit variable, en fonction de l'ensoleillement et sur une journée, ou une autre base de temps, elle aura stocké suffisamment d'eau pour les usagers).

Dans ces deux cas, on parle de fonctionnement «au fil du soleil» : il y a de la lumière, cela fonctionne ; il n'y en a plus, cela s'arrête.

Mais le plus souvent, on souhaite disposer d'énergie électrique dans l'obscurité pour de multiples raisons, et on doit alors la stocker :

- La montre ne doit pas s'arrêter la nuit (ni quand on la laisse un certain temps dans un tiroir),
- On s'éclaire plutôt quand il fait nuit,
- Une surveillance de barrage doit être active 24 h/24, ... etc.

Le système de stockage assure un rôle tampon, entre la production et l'utilisation en fixant la tension du système. Celle-ci reste dans la zone de fonctionnement Optimal (fonction d'adaptation d'impédance). Les deux principaux types d'accumulateurs utilisables actuellement sont les accumulateurs aux plombs – acide et l'accumulateur au cadmium – nickel (accumulateur à électrolyte alcalin).

Les accumulateurs au cadmium-nickel peuvent être utilisés pour des applications de puissance relativement faible. Le coût élevé de ce type d'accumulateurs (par rapport aux accumulateurs au plomb) en limite l'utilisation pour les minis et micro-puissance. Le stockage est représenté par des batteries, disposées en Seri/parallèle dont le nombre fixe la tension de fonctionnement et la capacité de stockage désirées [15 – 16]. Pour ces deux types des batteries la durée de vie est 10 à 15 ans, mais à condition de maintenir leur état de charge supérieur à 50%. [16]

La durée de vie des accumulateurs dépend en général de leur condition d'utilisation pour cela, il existe trois grandes utilisations pour les accumulateurs, qui sont :

- Batterie de démarrage utilisée dans les véhicules.
- Batterie de traction utilisée pour le dépannage.
- Batterie stationnaire utilisée dans les systèmes photovoltaïques.

Une batterie n'est pas seulement caractérisée par ses dimensions, son nombre d'éléments et sa capacité, mais aussi par les différents critères suivants :

- Durée de la décharge.

- Régime de décharge.
- Aptitude à la recharge.
- Température d'utilisation.
- Résistance mécanique.
- Fréquence des adjonctions d'eau distillée ou déminéralisée.
- Entretien.
- Durée de vie envisagée.

Il y a parfois contradiction dans les exigences, nécessitant alors un compromis ; c'est le cas de la batterie solaire à laquelle on demande des performances de batterie de traction et de batterie stationnaire :

- Batterie de traction, parce qu'on lui demande un cycle journalier de décharge (pas toujours suivi d'une recharge).
- Batterie stationnaire, parce qu'on lui demande de stocker une énergie et de la restituer en cas de coupure secteur, provoqué par l'absence de soleil.

Les paramètres les plus importants agissant sur la vitesse des réactions chimiques et électrochimiques à la base du fonctionnement des batteries sont : [16]

- Les paramètres externes : température, pression, temps.
- Les paramètres électriques : potentiel, intensité.
- Les paramètres de la solution : concentration des espèces électro-actives, nature du solvant, concentration de l'électrolyte.
- Les paramètres du transfert de masse : mode (diffusion), concentration à la surface de l'électrode.

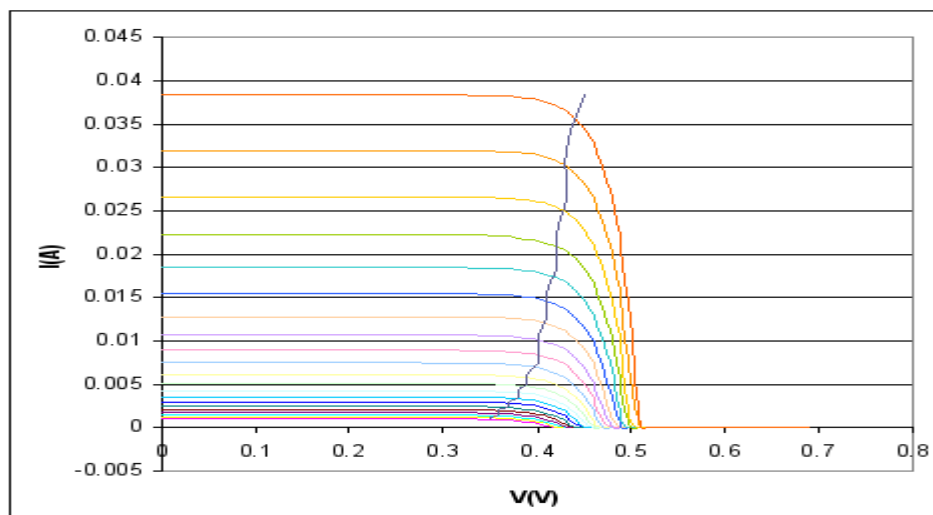
#### **I.8.6. Régulateur de charge**

Le régulateur de charge solaire est l'élément central d'une installation solaire. Il contrôle la production des panneaux tout en optimisant la durée de vie des batteries. Un régulateur de charge solaire adapté doit donc être soigneusement sélectionné. Lors de la sélection d'un régulateur de charge, le courant de court-circuit ( $I_{sc}$ ) des panneaux solaires est la caractéristique essentielle. Pour les régulateurs de charge MPPT, deux critères sont essentiels : d'une part, la somme de la puissance en  $W_c$  de tous les panneaux solaires raccordés, ne doit pas dépasser la puissance d'entrée maximale du régulateur de charge solaire. D'autre part, la tension à vide

( $U_{oc}$ ) de tous les panneaux solaires éventuellement montés en série, ne doit jamais dépasser tension d'entrée maximale du régulateur de charge solaire.

### I.8.6.1. La poursuite du point de puissance maximale (MPPT) :

Un générateur photovoltaïque est un générateur dont la caractéristique  $I = f(U)$  (figure I.22) est fortement non linéaire. En conséquence, pour un même éclairement, la puissance délivrée sera différente selon la charge. Un contrôleur MPPT permet donc de piloter le convertisseur statique reliant la charge (une batterie par exemple) et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge (la batterie).



**Figure I.22 :** Caractéristique I-V ou la MPPT fonctionne pour des différents ensoleillements

La figure I.23 montre un régulateur de charge qui bien commercialisé dans le marché.



**Figure I.23 :** Régulateur de charge

## **I.9. Gestion d'énergie dans un habitat alimentée par un système PV**

La gestion de l'énergie est un aspect primordiale pour tout type de système photovoltaïque qu'il soit connecté au réseau, multi-sources ou autonome.

L'optimisation du dimensionnement du système photovoltaïque autonome est une question complexe. Un compromis doit être trouvé entre avoir une bonne qualité d'approvisionnement énergétique et un cout économique acceptable pour le consommateur.

Parmi les solutions présentées dans la littérature, c'est celle de la gestion de la demande qui est préconisée. Cette dernière est basée sur une meilleure exploitation des consommations en trouvant un équilibre entre la production et consommation pour avoir un meilleur compromis tout en respectant le confort de l'utilisateur.

Plusieurs auteurs ont travaillé sur ce sujet avec différentes conditions et pour divers objectifs.

### **I.9.1 Gestion de la demande**

La gestion de la demande représenté depuis plusieurs années un moyen utile dans l'optique de mieux rentabiliser la production d'électricité d'origine renouvelable. Notons par exemple, qu'un prix d'un système photovoltaïque raisonnable encouragera les consommateurs à utiliser ces moyens pour leurs besoins énergétiques électriques.

En 2004, Al-Alawi et al ont travaillé sur le décalage de fonctionnement des charges aux moments les plus ensoleillés dans la journée pour améliorer l'efficacité du système.

Une étude de l'impact du profil de consommation sur le dimensionnement du système photovoltaïque autonome avec générateur diesel est menée par Y.Thiaux et al (2010).

Dans ce travail les autres ont étudié la possibilité de gérer les charges domestiques soit par décalage ou délestage afin d'ajuster la consommation à la production électrique.

Certains gestes faciles, comme le décalage temporel ou la modulation d'amplitude, peuvent être envisagés individuellement sur différentes charges électriques de façon à éviter les pics de puissances dans la journée.

Parmi les travaux qui ont été faites dans ce sujet on a :

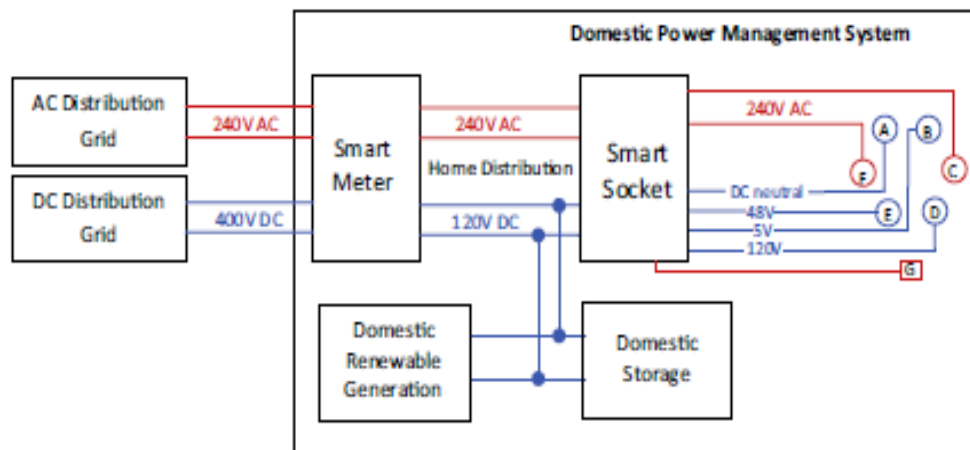
a) **Un concept de gestion de l'énergie intelligente : applications Smart socket avec distribution DC [17]**

Les développements récents dans l'électronique de puissance augmentent l'utilisation du bus DC dans les systèmes de distribution électrique, En raison de ses nombreux avantages par rapport au système de distribution AC en termes d'efficacité énergétique, de sécurité, la compatibilité électromagnétique et l'intégration des énergies renouvelables. [18]

Ce système prend en charge la gestion de la charge côté demande, la génération distribuée et le stockage distribué

L'automatisation de la gestion de l'alimentation et présente un algorithme de délestage pour le contrôle de la charge de la prise pour les bâtiments.

*C. Keles et al./Electrical Power and Energy Systems 64 (2015) 679-688*



**Figure I.24 :** Schéma des systèmes domestiques de gestion de l'énergie pour les maisons intelligentes

### b) Le délestage de la charge [20]

Le délestage électrique consiste à supprimer l'alimentation d'un groupe d'appareils selon leurs priorités afin d'éviter la saturation de l'alimentation électrique. (Figure I.25)

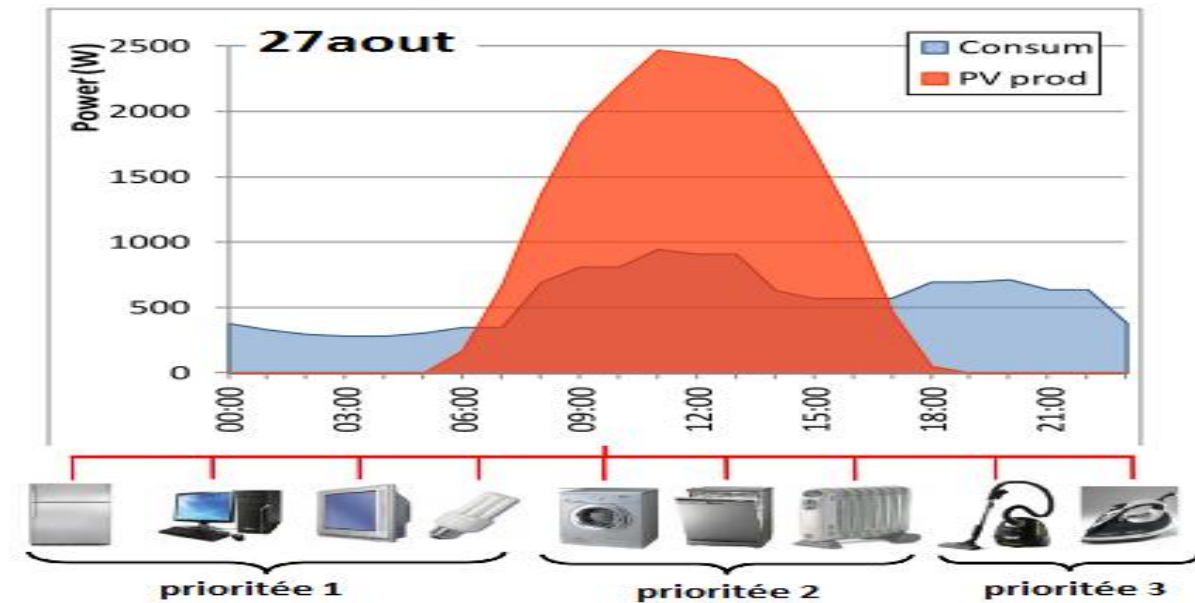


Figure I.25 : profil de consommation et de production et classement de priorité des charges

### c) Le décalage temporel [21]

Consiste à reporter ou avancer le fonctionnement d'une charge pour profiter des moments où la production PV est maximum. Comme le montre la figure I.26.

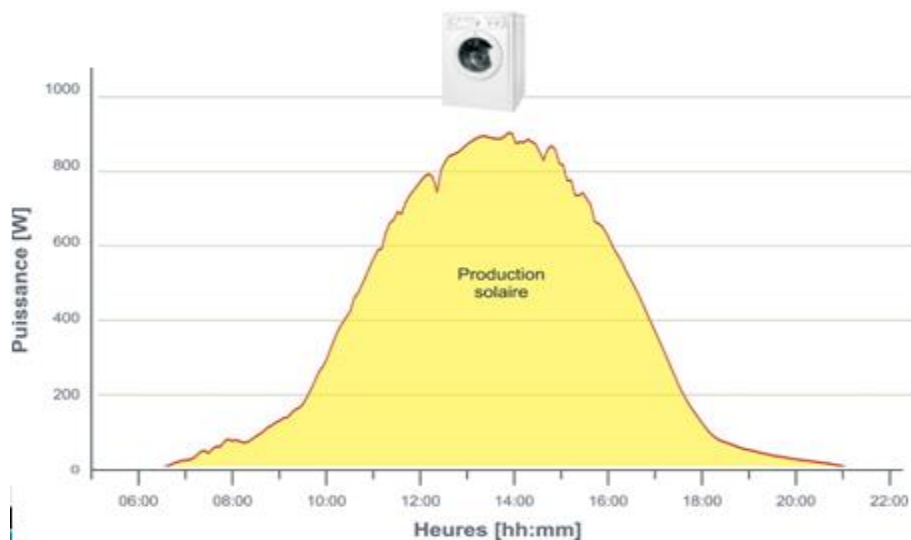
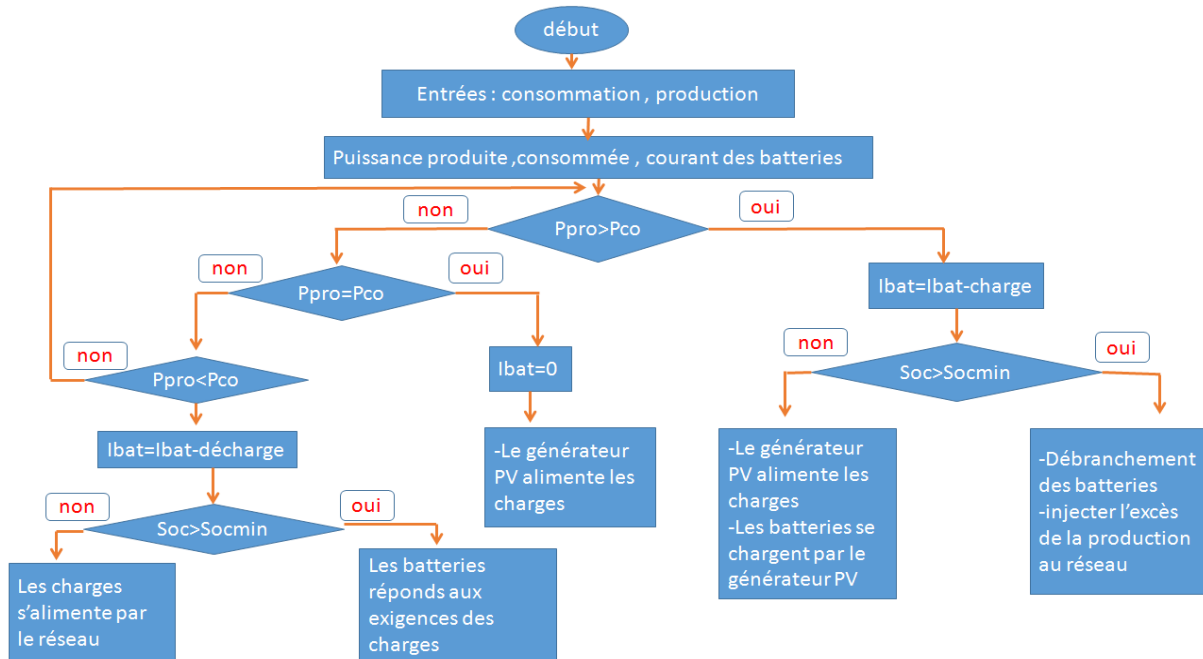


Figure I.26 : exemple de décalage de l'utilisation de la machine à laver

### I.9.1. Organigramme avancé de la gestion d'énergie



**Figure I.27 :** Organigramme de gestion d'énergie

Un modèle d'optimisation d'une bonne gestion d'énergie est représenté par l'organigramme de la figure I.27.

Ce modèle a comme entré les puissances produite, consommée et du stockage, à chaque fois il compare la puissance consommée et la puissance produite pour savoir s'il appelle l'énergie stocké ou celle du réseau publique.

### I.10. Conclusion

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie renouvelable qui provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein des matériaux bien particuliers tels que les semi-conducteurs (le silicium, le Germanium, l'Arséniure des Galium,...). Afin de la rendre réalisable physiquement, elle nécessite un équipement complémentaire dit Système photovoltaïque, contenant les composants d'amélioration nécessaires qui rendent l'électricité produite consommable (régulation, conversion CC/AC...)

Dans ce chapitre nous avons présentés des notions générales sur les systèmes photovoltaïques, synthèse d'assemblage des panneaux et une spécification des différentes zones de fonctionnement et les avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque [11] ainsi que différents exemples de gestion d'énergie avec un modèle d'optimisation de bonne gestion d'énergie présenté sous forme d'un organigramme bien détaillée.

# **Chapitre II**

## **Modélisation et dimensionnement du système**



## II.1. Introduction

Afin d'étudier le comportement d'un système photovoltaïque autonome en fonction de la production et la consommation d'énergie électrique, le recours à la modélisation des différents constituants du système est indispensable. Dans ce mémoire, la modélisation nous a permis de développer une nouvelle stratégie de gestion d'énergie appropriée, à l'aide d'un outil de simulation sous Matlab-Simulink dans l'optique d'optimiser le dimensionnement des systèmes photovoltaïques destinés à l'électrification des maisons individuelles.

Dans la première partie de ce chapitre nous allons faire une configuration de la maison solaire proposée (site, superficie) et une évaluation de ces besoins énergétiques (profil de consommation). Puis nous allons faire la modélisation et le dimensionnement du système PV proposé pour alimenter la maison (nombre de panneaux PV, batteries, régulateurs de charge, onduleur ...).

## II.2. Maison solaire photovoltaïque

Il s'agit d'une maison solaire à basse consommation énergétique, alimentée, comme son nom l'indique, par l'électricité solaire, permettant le fonctionnement des équipements de froid, de climatisation et le chauffage solaire. Elle injecte le surplus de sa production aux réseaux électriques publics [2].

La maison solaire sur laquelle nous allons faire notre étude se situe à l'Unité de Développement des Equipement Solaire (UDES) à la ville de Bou-Ismaïl qui est une ville côtière (figure I.1). [12]. Ces coordonnées sont ( $36^{\circ} 38' 33''$  N,  $2^{\circ} 41' 24''$  E) son altitude varie entre (0m et 210m), elle reçoit une irradiation moyenne annuelle de ( $5.04 \text{ KWh/m}^2/\text{jour}$ ) [13].



**Figure II.1 :** carte de la ville de Bou-Ismaïl

La figure II.2 présente la maison solaire sur laquelle, nous allons faire notre étude.



**Figure II.2 :** Maison solaire située à l'UDES (Bou-Ismaïl)

### **II.3. Les besoins énergétiques de la maison solaire étudiée**

La maison que nous allons étudier est constituée de deux pièces (chambre et séjour), une cuisine et les sanitaires. Sa consommation énergétique est comme suite :

	Equipements	Puissance (W)	Heure (h)
<b>Chambre</b>	Lampe	20	4
	Laptop	45	5
	Faire a repassé	1400	1
<b>Séjour</b>			
	Climatiseur	2500	7
	Télé-Démo	60	6
	Lampe	20	5
	Modem	12	24
<b>Cuisine</b>			
	Machine a lavé	600	1
	Micro-onde	700	1
	Réfrigérateur	190	12
	Lampe	20	6
	Hotte	110	2
<b>Sanitaire</b>			
	Lampe	20	1
	Lampe	20	1

**Tableau II.1** : équipements de la maison étudiée

La consommation énergétique de la maison varie chaque saison sa revient aux appareils électroménagers utilisée comme le climatiseur en été et le chauffage en hiver, ça se montre dans les profils de charge de chaque saison.

Nous avons fait une étude sur les profils de charges de chaque saison ou nous avons obtenus des profils de charges journalières et hebdomadaires.

➤ .Consommation énergétique en été.

La figure II.3 représente les consommations journalières de la maison solaire en été.

maison	equipement	puissance	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
sejour	climatiseur (Load 2)	2500		2500				2500								2500	2500	2500						2500	2500		
	tele-démo (Load 1)	60													60	60				60	60	60			60	60	
	lampe (Load 9)	20							20	20													20	20	20		
	modem (Load 3)	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	
chambre	lampe (Load 9)	20							20	20															20	20	
	laptop (Load 4)	45,03													45	45							45	45,03	45,03		
	faire a repasé (Load 5)	1400															1400										
cuisine	machine a laver (Load 6)	600										600															
	micro-onde (Load 7)	700								700																	
	lapme (Load 9)	20																					20	20	20		
	refregerateur (Load 8)	190	190		190	190		190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	
	hotte (Load 10)	110												110										110			
sanitaire	lampe (Load 9)	20								20																20	
	lampe (Load 9)	20								20																20	
total			202	2512	202	12	202	2512	242	792	202	612	202	122	307	2614	4102	2512	202	72	262	72	397	2597	2867	132	

Figure II.3 : Consommation journalière de la maison solaire en été

La figure II.4 représente le profil de charge journalier en été.

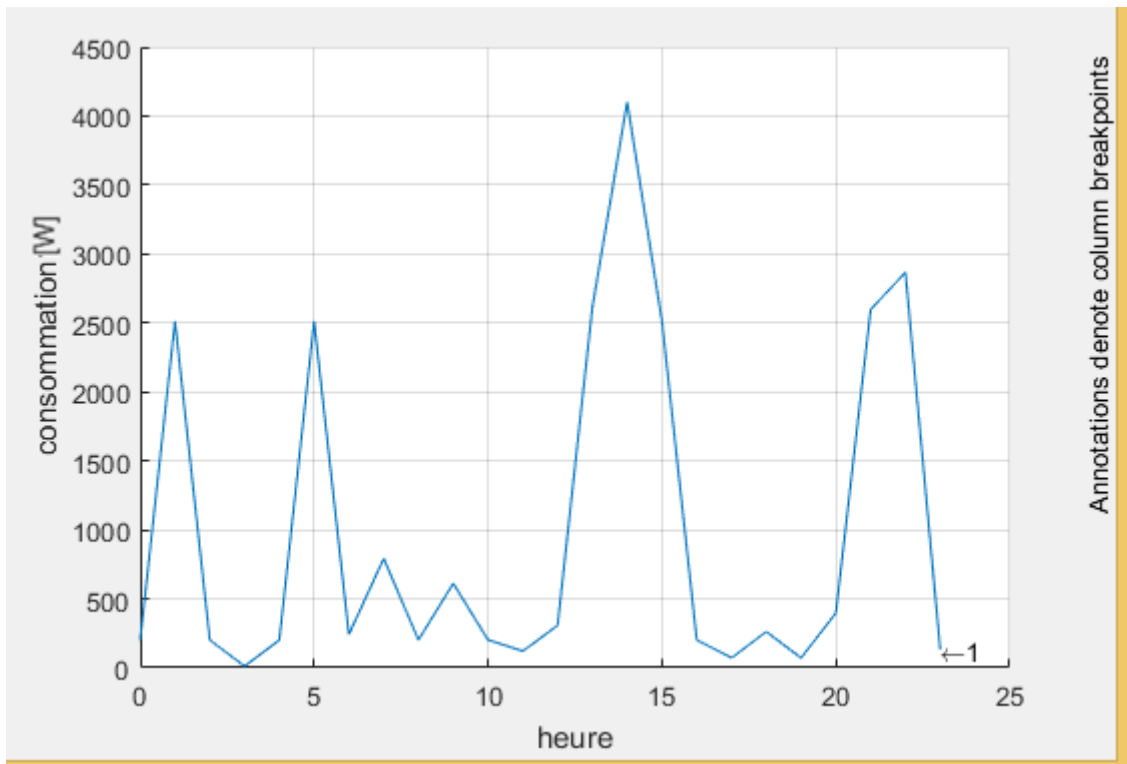


Figure II.4 : Profil de charge journalier de la maison solaire en été

La figure II.5 représente le profil de charge hebdomadaire de la maison solaire en été.

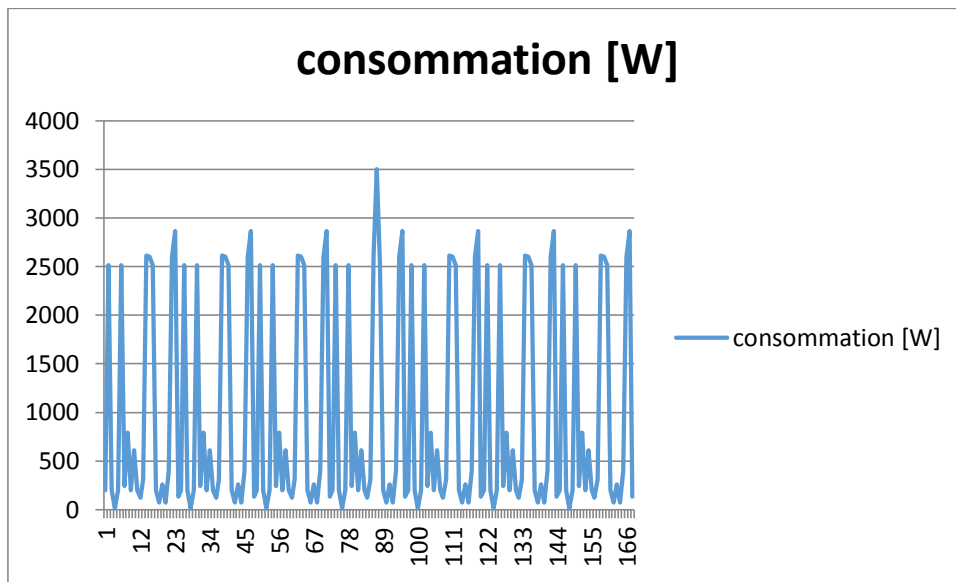


Figure II.5 : Profil de charge hebdomadaire de la maison solaire en été

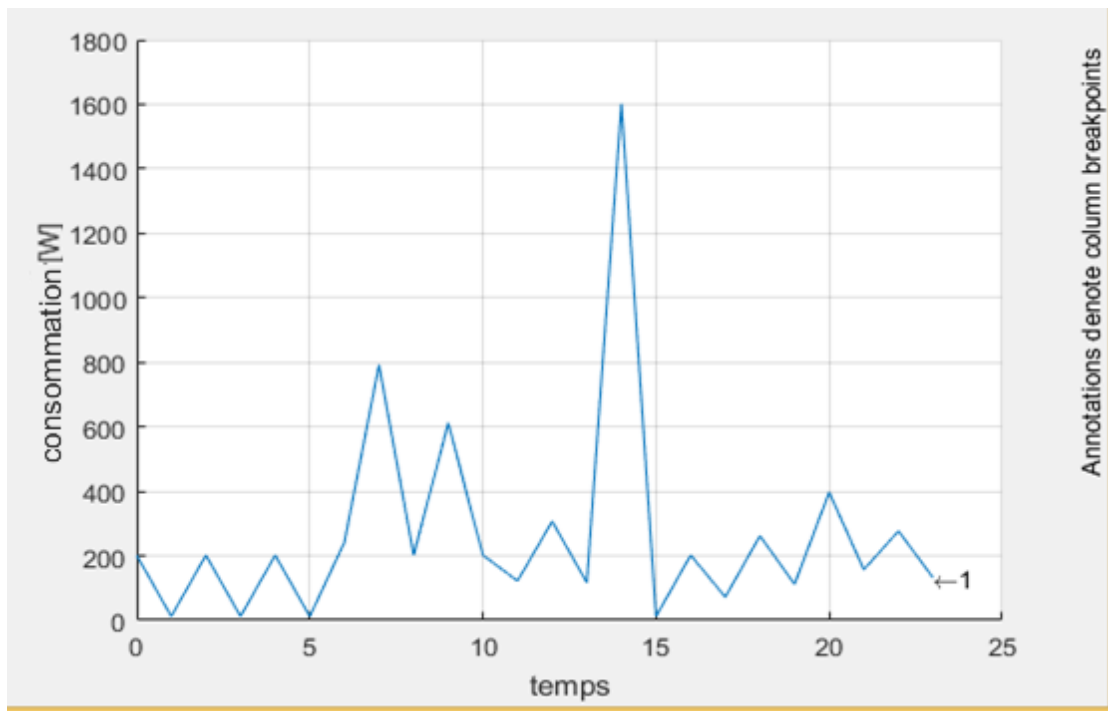
➤ Consommation énergétique en printemps

La figure II.6 représente la consommation journalière de la maison solaire en printemps.

maison	equipement	puissance	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
sejour	tele-démo	60												60	60					60	60	60		60		
	lampe	20							20	20												20	20	20		
	modem	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
chambre	lampe	20						20	20																20	20
	laptop	45,03												45	45								45,03	45,03	45,03	
	faire a repas	1400														1400										
cuisine	machine a la	2000										600														
	micro-onde	700							700																	
	lapme	20							20													20	20	20		
	refregerateu	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190
	hotte	110												110									110			
sanitaire	lampe	20								20																20
	lampe	20								20																20
total			202	12	202	12	202	12	242	792	202	612	202	122	307	117	1602	12	202	72	262	112	397	157	277	132

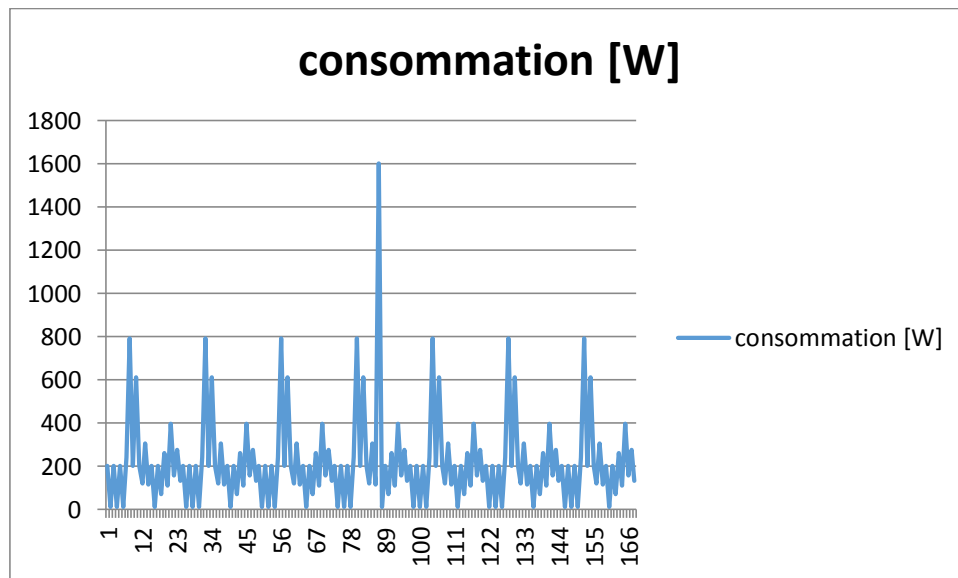
Figure II.6 : Consommation journalière de la maison solaire en printemps

La figure II.7 représente le profil de charge journalier de la maison solaire en printemps.



**Figure II.7 :** Profil de charge journalier de la maison solaire en printemps

La figure II.8 représente le profil de charge hebdomadaire de la maison solaire en printemps.



**Figure II.8 :** Profil de charge hebdomadaire de la maison solaire en printemps

➤ Consommation énergétique en hiver

La figure II.9 représente la consommation journalière de la maison solaire en hiver.

maison	equipement	puissance	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
sejour	bain d'huile	1500	1500	1500	1500				1500				1500						1500	1500			1500	1500		
	tele-démo	60													60	60				60	60	60		60		
	lampe	20							20	20												20	20	20		
	modem	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
chambre	lampe	20							20	20															20	20
	laptop	45,03												45,03	45,03							45,03	45,03	45,03		
	faire a repas	1400															1400									
cuisine	machine a la	600										600														
	micro-onde	700								700																
	lapme	20									20											20	20	20		
	refregerateu	190	190		190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190		
	hotte	110												110										110		
sanitaire	lampe	20									20														20	
	lampe	20									20														20	
total			1702	1512	1702	12	202	12	242	2292	202	612	202	1622	307	117	4102	12	202	1622	1612	112	397	1657	1777	132

Figure II.9 : Consommation journalière de la maison solaire en hiver

La figure II.10 représente le profil de charge journalier de la maison solaire en hiver.

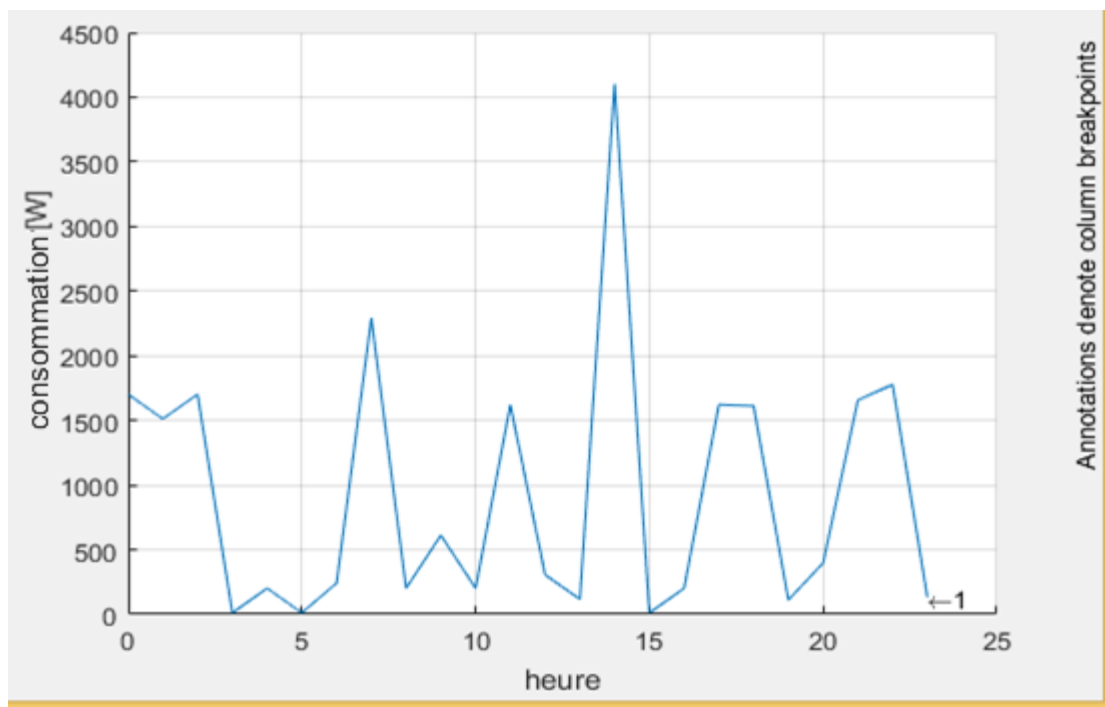


Figure II.10 : Profil de charge journalier de la maison solaire en hiver

La figure II.11 représente le profil de charge hebdomadaire de la maison en hiver.

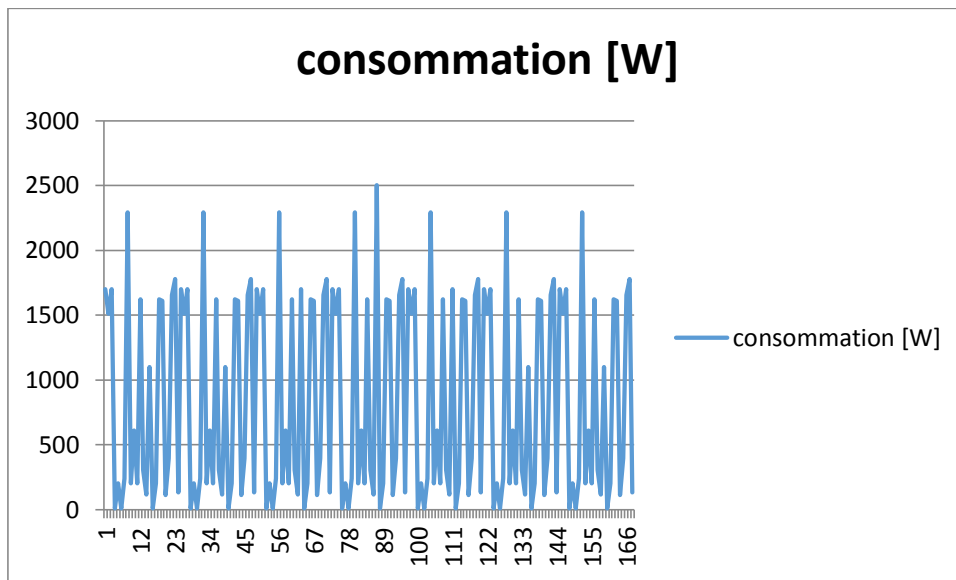


Figure II.11 : Profil de charge hebdomadaire de la maison solaire en hiver

PS : L'utilisation de la machine à lavez et le fer à repasser influe de façons très importante sur la consommation hebdomadaire.

#### II.4. Modélisation du système PV



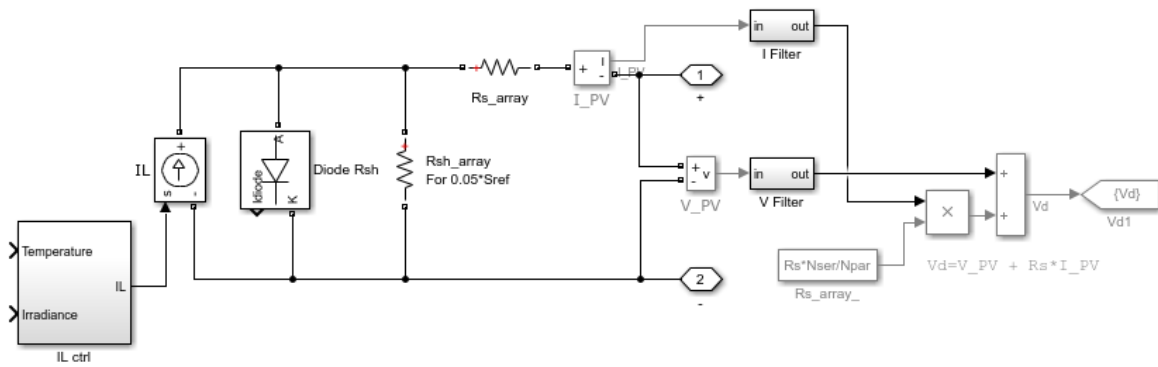
Figure II.12 : Système PV

##### II.4.1. Modélisation du module PV

La figure III.13 représente le schéma électrique équivalent d'un module photovoltaïque.



$I_{pv}$  et  $V_{pv}$  sont respectivement le courant et la tension aux bornes du module photovoltaïque



. **Figure II.13** : schéma électrique équivalent du module PV sous Matlab-Simulink

Le modèle choisi pour la simulation du module PV est celui d'une seule diode [1]. Le circuit électrique du modèle utilisé représenté sur la Figure II. 13.

(II. 1)

$$I = I_{ph} - I_0 \left( e^{\left( \frac{V + IR_s}{V_t} \right)} - 1 \right) - \left( \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \right)$$

Où  $I_{ph}$  est le photo-courant généré dans les conditions de test standard (STC),  $I_0$  est le courant de saturation aux STC,  $R_s$  est la résistance série du module,  $R_{sh}$  est la résistance parallèle,  $V_t$  est la tension thermique qui est donnée par :

$$V_t = \frac{m K T_{STC}}{q}$$

(II. 2)

Caractéristiques de la diode :

$$I_d = I_0 * [\exp (V_d/V_T) - 1]$$

(II.3)

Ou :  $I_d$  = courant de la diode (A)

$V_d$  = tension de la diode (V)

$I_0$  = courant de saturation de la diode (A)

$V_T$  = tension de température =  $k * T_{cell\_K} / q * n_i * N_{cell} * N_{ser}$

$T_{cell\_K}$  = température de la cellule PV (K),

$k$  = constante de Boltzmann =  $1.3806e-23 \text{ J.K}^{-1}$

$q$  = charge d'électron =  $1.6022e-19 \text{ C}$

$nI$  = facteur d'idéalité de la diode

$N_{\text{cell}}$  = nombre de cellules en séries

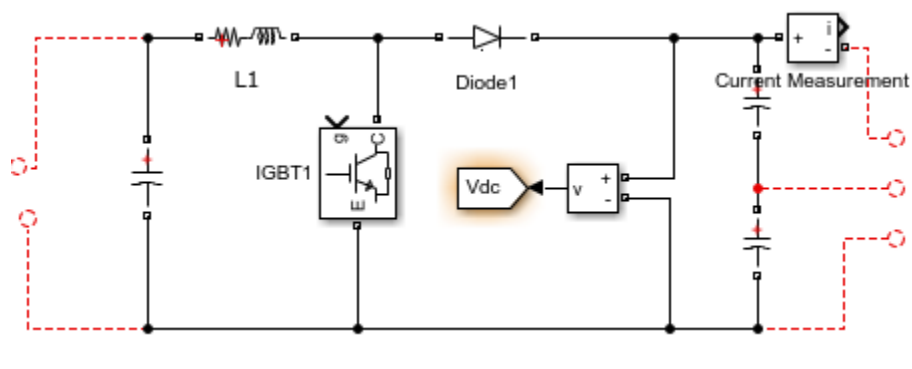
$N_{\text{ser}}$  = nombre de cellules en parallèles

#### II.4.2. Modélisation du convertisseur DC/DC

Le circuit électrique équivalent du convertisseur DC-DC est illustré sur la figure II.14.

Les valeurs calculées des différents composants du convertisseur sont :

$L=3.5\text{mH}$ ,  $C_1=5.6\text{mF}$ ,  $C_2=5.6\text{mF}$ , Frequency=20 kHz, Switch(S) =IRFP360, Diode (D) =UF5402



**Figure II.14** : schéma électrique équivalent d'un convertisseur DC/DC sous Matlab/Simulink

#### II.4.3. Modélisation du système de stockage

A cause de non disponibilité permanente de l'énergie solaire, pour diverses raisons : Météo, temps dans la journée, saisons etc., l'utilisation des batteries pour le stockage d'énergie est nécessaire pour garantir une disponibilité permanente et constante de l'énergie quelles que soient les conditions atmosphériques ou l'horaire du moment.

La batterie est un ensemble de cellules électrochimiques capables de stocker de l'énergie électrique sous forme chimique (pendant la charge), puis de la restituer par la suite (pendant la décharge) grâce à la réversibilité des réactions mises en jeu. Ces réactions consistent en des oxydations et des réductions (oxydoréductions en abrégé, soit perte ou gain d'un ou plusieurs

électrons) au niveau des électrodes, le courant circulant sous forme d'ions dans l'électrolyte et sous forme d'électrons dans le circuit raccordé à la batterie.

Afin d'étudier le fonctionnement de la batterie, nous avons utilisé le modèle de Copetti qui est le plus fiable. Ce modèle est applicable pour les batteries plomb-acide, en particulier pour les batteries solaires. Il simule le comportement dynamique de la batterie en tenant compte de l'ensemble des processus qui résultent : la décharge, la charge et la surcharge tout en tenant compte du changement de la température de la batterie. Dans ce qui suit, nous présentons le modèle de Copetti pour la description de la batterie à travers l'expression de sa décharge et sa charge.

#### II.4.3.1. Modélisation de la charge de la batterie

La tension aux bornes de la batterie au cours du processus de charge est donnée par l'équation :

$$V_{\text{bat}_c}(t) = [2.085 - 0.12(1 - SOC)] - \frac{I}{C_{10}} \left( \frac{4}{1 + I^{1.3}} + \frac{0.27}{SOC^{1.5}} + 0.02 \right) (1 - 0.007\Delta T) \quad (\text{II. 4})$$

Où  $\Delta T$  Représente la différence entre la température ambiante de la batterie et la température de référence ( $T_{\text{ref}} = 25^\circ \text{C}$ )

$$\Delta T = T - T_{\text{ref}} \quad (\text{II.5})$$

L'état de charge de la batterie SOC quantité d'électricité emmagasinée pendant la charge à l'instant t donné et (1-SOC) est la profondeur de décharge. Ils sont donnés par les relations suivantes :

$$SOC = 1 - \frac{Q}{C} \quad (\text{II.6})$$

$$DOD = \frac{Q}{C} = \frac{It}{C} \quad (\text{II.7})$$

Où Q représente les ampères-heures emmagasinés dans la batterie pendant un temps t avec un courant de charge I.

L'efficacité de la batterie pendant la décharge est supposée égale à 100% ; cependant, la capacité totale utile pendant la décharge est limitée par l'intensité de courant et la température.

Cette dernière est normalisée par rapport la capacité nominale  $C_{10}$  au courant nominal . Elle est donnée par la formule suivante :

$$\frac{C}{C_{10}} = \frac{1.67}{1 + 0.67(I/I_{10})^{0.9}} (1 + 0.005\Delta T) \quad (\text{II.8})$$

#### II.4.3.2. Modélisation de la décharge de la batterie

L'équation de décharge de la batterie est donnée par :

$$V = [V_g + (V_{ec} - V_g) \left[ 1 - \exp\left(\frac{0.95C - AH_{restored}}{I\tau}\right) \right]] \quad (\text{II.9})$$

#### II.4.3.2. Modélisation de la surcharge de la batterie

L'équation de tension de surcharge est donnée par la relation :

$$V = [V_g + (V_{ec} - V_g) \left[ 1 - \exp\left(\frac{0.95C - AH_{restored}}{I\tau}\right) \right]] \quad (\text{II.10})$$

$V_g$  et  $V_{ec}$  représente la tension de gazéification ainsi que la tension de charge finale respectivement

$$V_g = \left[ 2.24 + 1.97 \ln\left(1 + \frac{I}{C_{10}}\right) \right] (1 - 0.002\Delta T) \quad (\text{II.11})$$

$$V_{ec} = \left[ 2.45 + 2.011 \ln\left(1 + \frac{I}{C_{10}}\right) \right] (1 - 0.002\Delta T) \quad (\text{II.12})$$

$AH_{restored}$  représente les ampères-heures stockées dans la batterie par rapport à sa capacité  $C$  pour un courant de charge  $I$  au cours de cette heure. Il est supposé que 95% de la capacité est déjà restauré au début de la charge. La constante de temps  $\tau$  est inversement proportionnelle à l'intensité du courant et, en tant qu'une approximation, on peut écrire :

$$\tau = \frac{17.3}{1 + 852(I/C_{10})^{1.67}} \quad (\text{II.13})$$

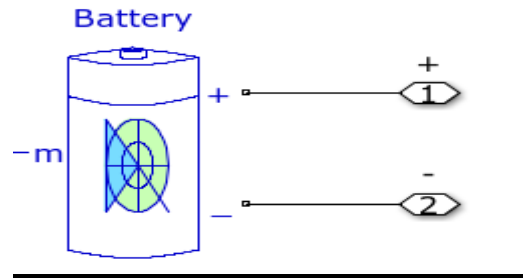


Figure II.15 : modèle de la batterie utilisée sous Matlab/Simulink

#### II.4.4. Modélisation du convertisseur DC/AC

Actuellement, toutes les résidences sont équipées de charges à courant alternatif, ce qui nécessite l'utilisation d'un convertisseur DC/AC pour un système PV. Le rendement énergétique d'un onduleur est variable (Figure II.16), et sa perte en énergie dépend de son point de fonctionnement.

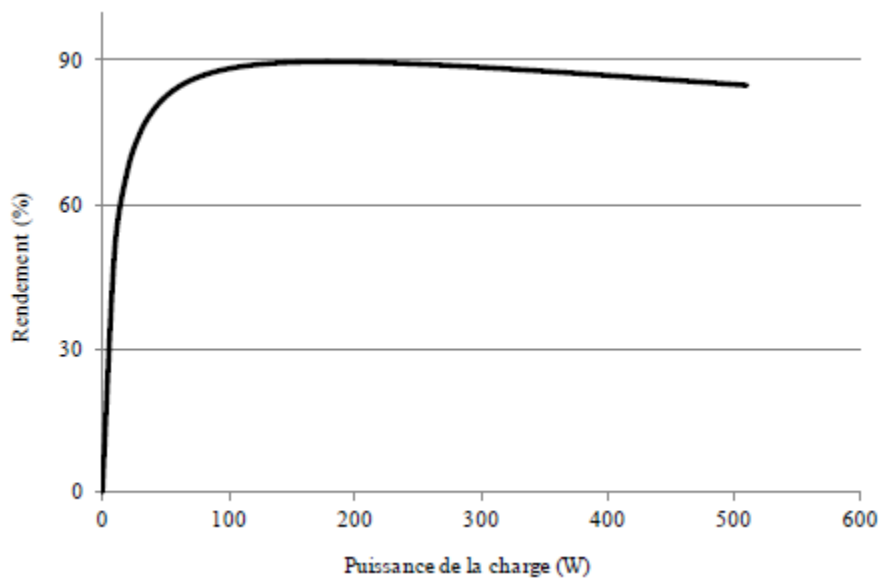


Figure II.16 : exemple de rendement énergétique d'un onduleur de 500W

Les modèles de l'onduleur sont présentés dans plusieurs travaux. Dans le cas de notre étude et pour plus de précision, le modèle du rendement polynomial donnée par l'équation (II.14) a été utilisé. Ce modèle a été validé expérimentalement par Gergaud et al (2002) [22].

$$\eta_{inv}(t) = \frac{1}{1 + \frac{\alpha_{inv} \cdot S_{inv}}{P_{ch}(t) \cdot S_{inv,ref}} + \beta_{inv} + \frac{\gamma_{inv} \cdot P_{ch}(t) \cdot S_{inv,ref}}{S_{inv}}} \quad (II.14)$$

Ou,  $S_{inv,ref}$  est la puissance de référence qui est égale à 4.5 KVA et  $S_{inv}$  est la puissance nominale de l'onduleur utilisé. Les valeurs données pour les paramètres  $\alpha_{inv}$ ,  $\beta_{inv}$  et  $\gamma_{inv}$  sont respectivement, 43.09[SI],  $4.6 \times 10^{-3}$  [SI] et  $3.3 \times 10^{-5}$  [SI]. Selon Riffonneau et al (2011) ; ces paramètres permettront de modéliser différentes dimensions d'onduleurs [23].

### II.4.5. Modélisation du réseau électrique

Le réseau triphasé trois grandeurs sinusoïdales de même fréquence, déphasées entre elles de  $2\pi/3$ , et ayant même valeur efficace, forment un système triphasé équilibré.

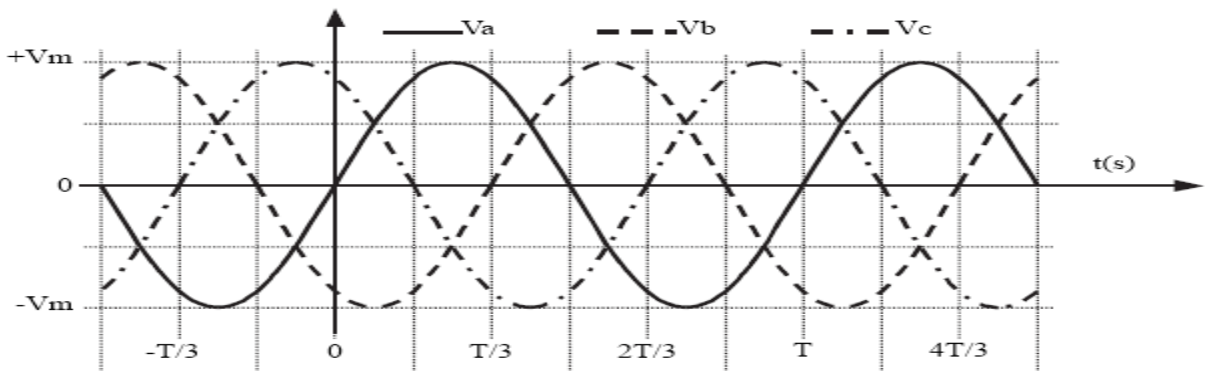


Figure II. 17 : Système de tensions triphasé équilibré

Réseau de distribution électrique. Il est basé sur un système triphasé de tensions. On peut généralement considérer que  $(V_a, V_b, V_c)$ . Il est un système de tensions triphasé équilibré direct. Il en est de même pour  $(U_{ab}, U_{bc}, U_{ca})$ . On a :

$$\begin{cases} V_a = V_m \sin(\omega t) \\ V_b = V_m \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ V_c = V_m \sin(\omega t - 4\pi/3) \end{cases} \quad (II.15)$$

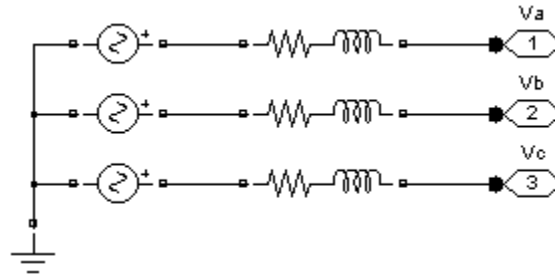
$$\begin{cases} U_{ab} = V_a - V_b \\ U_{bc} = V_b - V_c \\ U_{ca} = V_c - V_a \end{cases} \quad (II.16)$$

Relations pour un système triphasé équilibré

$$\begin{cases} V_m = \sqrt{2} V_{eff} \\ U_m = \sqrt{3} V_{eff} \\ U_{eff} = \sqrt{3} V_{eff} \end{cases} \quad (II.17)$$

Le Schéma de simulation du réseau est représenté dans la figure II.17.

Ces caractéristiques : BT (800V / 1.38KV) avec une fréquence de 50 Hz raccordé à un filtre de lissage de courant : Résistance égale  $0.8929\Omega$  et l'inductance  $16.58 * 10^{-3} \text{ H}$



**Figure II. 18 :** Schéma de simulation de réseau sous Matlab-Simulink

#### II.4.6. Modélisation théorique de la charge

Les données de la consommation de l'énergie électrique sont nécessaires pour une bonne planification des réseaux de distribution d'électricité et pour déterminer la capacité de production nécessaire.

Les modèles de la demande d'électricité sont souvent appliqués pour prévoir la consommation énergétique. Des études approfondies sur le sujet déjà été menées, entraînant un grand nombre de méthodes et de modèles de prévision. Ces méthodes d'estimation sont généralement utilisés quand il ya peu ou pas de données sur la consommation de l'énergie électrique.

Par exemple, pour la simulation du fonctionnement d'un réfrigérateur ou chauffage, les auteurs Missaoui et al (2011) et Gregory et al (2011) sont utilisé un modèle thermique pour la gestion des flux énergétique dans un habitat [22] [23]. Ce model dépend de la température interne  $T_{int}$ , de la température ambiante  $T_a$  et de la puissance de l'appareil. A titre d'exemple un réfrigérateur, en fonctionnement voit la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur augmenter dans un intervalle de temps, par contre cette différence diminue au repos. Ce phénomène est présenté par le modèle thermique traduit par l'équation (II.18).

$$\frac{d(T_{int} - T_a)}{dt} = -\frac{1}{\tau} (T_{int} - T_a) + \frac{G}{\tau} P_{ref} \quad (II.18)$$

Ou,  $\tau$  est une constante de temps,  $G$  est le gain en refroidissement et  $P_{ref}$  est la puissance du réfrigérateur. La figure II.18 représente le modèle de simulation du réfrigérateur sous Matlab-Simulink.

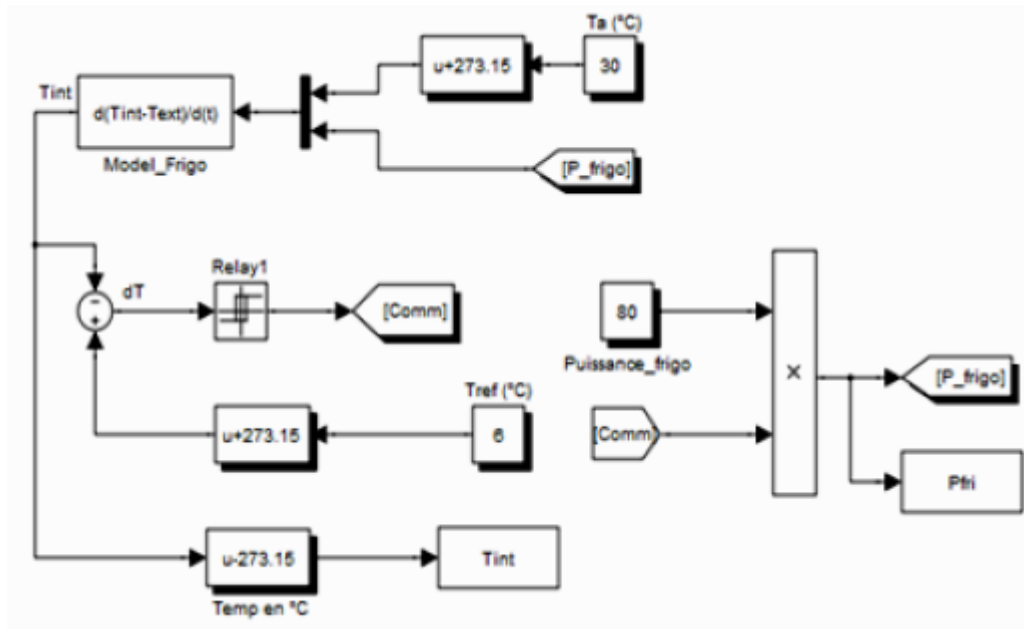


Figure II. 19 : Modèle de réfrigérateur sous Matlab-Simulink

## II.5. Méthode de dimensionnement et optimisation d'un système PV

Avant l'installation de tout système photovoltaïque, une étape primordiale est celle du dimensionnement de l'installation photovoltaïque. Dimensionner un système PV revient à déterminer l'ensemble des éléments de la chaîne PV, notamment le couple générateur PV / Capacité de stockage en fonction de l'éclairement au cours de l'année, du profil annuel de consommation et du rendement du système. Il est alors évident qu'une demande importante en énergie augmentera la taille et le coût du système, mais un choix de composants à haut rendement énergétique permettra de réduire ce dernier. Une installation surdimensionnée signifie des surcoûts, tandis qu'une installation sous dimensionnée engendra une fiabilité non désirée.

Les paramètres à prendre en compte pour concevoir et dimensionner un système photovoltaïque sont assez nombreux et concernent :

- Le lieu d'installation du système photovoltaïque
- Le système photovoltaïque autonome
- Le profil de consommation

Les paramètres concernant le système PV donnent à titre indicatif un ordre de grandeur du rendement de l'installation qui est relatif aux modules photovoltaïques, éléments de batterie, régulateur et convertisseur existant sur le marché. Ces paramètres sont basés sur les critères de la satisfaction des besoins, le fonctionnement optimal du système et la disponibilité.



### II.5.1. Paramètres relatifs au site d'installation

Le dimensionnement du générateur PV est dicté par les conditions relatives au site. Pour adopter les capacités générateur PV / Batterie, aux conditions de charge, il est indispensable de connaître les caractéristiques de l'irradiation solaire par jour ou par mois, en d'autres termes l'énergie moyenne reçue sur un plan donné, à l'endroit même où sera installé le générateur PV.

Les données doivent être connues pour chaque mois de l'année. Elles peuvent être fournies par des organismes nationaux de météorologie ou obtenues par des calculs (outil informatique), à partir des paramètres d'entrées suivants :

- Latitude de lieu d'installation
- Altitude du lieu d'installation
- Réflectivité du sol ou albédo
- Irradiation moyenne journalière la plus défavorable dans l'année, qui mesurée ou calculée.

#### a- Paramètre concernant le module PV

Les paramètres concernant le module PV sont :

- La tension maximale
- Le courant maximal
- La puissance maximale

Les paramètres sont généralement donnés par le constructeur aux conditions standards (1000W/m<sup>2</sup>, 25 °C).

- L'inclinaison des modules, est un paramètre qui est relatif à la latitude du lieu

#### b- Paramètres concernant les batteries de stockage

Les paramètres du système de stockage sont donnés relativement aux capacités des batteries et caractérisées par :

- La profondeur de décharge selon le constructeur.
- Le rendement énergétique de la batterie.

#### c- Paramètres concernant le régulateur de charge

Les paramètres sont, la tension selon la puissance de la charge et le rendement donné par le constructeur, il est caractérisées par :

- La tension et le courant d'entrée
- La tension et le courant de sortie

d- Paramètres concernant le convertisseur DC/AC

Pour le convertisseur DC/AC (l'onduleur) on précisera le rendement seulement, qui est aussi donnée par le constructeur.

e- Paramètres concernant la charge

Les paramètres concernant la charge sont :

- Le type d'alimentation (Continue ou Alternatif)
- La puissance de la charge
- La durée de fonctionnement moyenne par jour.

## II.5.2. Dimensionnement

### 1) Dimensionnement du générateur PV

Pour dimensionner le générateur PV, deux paramètres sont pris en compte, la consommation moyenne journalière et l'irradiation incidente moyenne journalière reçue sur le plan des modules, en considérant l'inclinaison du générateur fixe.

L'énergie fournie par un module est proportionnelle à l'irradiation, le dimensionnement se base sur le mois le plus défavorable. On détermine alors l'énergie fournie par un module dans les conditions de l'éclairement et de la température choisie selon le site de l'installation

Les condition standards :  $G_{a0}=1000\text{W/m}^2$  ,  $T_{a0}=25\text{ }^{\circ}\text{C}$

L'énergie fournie par un module a pour expression

$$E_{\text{mod}} = P_m \cdot \frac{I_{\text{RR}}}{G_{a0}} \cdot F_{\text{CG}} \quad (\text{II.19})$$

Ou :

$E_{\text{mod}}$  : Energie journalière fournie par le module (KWh)

$P_m$  : puissance du module dans la condition désirée (W)

IRR : Irradiation journalière (kWh/m<sup>2</sup>)

FCG : facteur de correction global, contenant les divers rendements ainsi qu'un coefficient de sécurité (%)

Le nombre total des modules  $N_m$  constituant le générateur PV est donné par l'expression suivante (charge à courant continue) :

$$N_m = \frac{E_{ch}}{E_{mod} \cdot \eta_r} \quad (II.20)$$

$E_{ch}$  : Energie journalière consommée par la charge (KWh)

$\eta_r$  : Rendement du régulateur (%)

$$E_{ch} = P_{ch} \cdot D_{FJ} \quad (II.21)$$

$D_{FJ}$  : Durée de fonctionnement journalière (h)

La puissance du générateur est exprimée par l'équation

$$P_{pv} = N_m \cdot P_m \quad (II.22)$$

Le nombre de modules disposées en série  $N_{ms}$  est le rapport entre la tension nominal du régulateur utilisé  $V_{nr}$  et la tension nominale du module  $V_m$

$$N_{ms} = V_{nr} / V_m \quad (II.23)$$

On déduit le nombre de branches en parallèle comme suit :

$$N_{mp} = N_m / N_{ms} \quad (II.24)$$

Dans le cas ou la charge serait alimentée avec un courant alternatif en sortie de l'onduleur, le nombre total de modules prend une nouvelle valeur :

$$N_{ma} = N_m / \eta_{inv} \quad (II.25)$$

$\eta_{inv}$  : Rendement de l'onduleur (%)

On déduit la nouvelle valeur du nombre de branches parallèles comme suit :

$$N_{mpa} = N_{ma} / N_{ms} \quad (\text{II.26})$$

PS : La taille du générateur est calculée à partir de la surface correspondante uniquement à la surface active du semi-conducteur.

## 2) Dimensionnement du stockage

La détermination du parc batterie est réalisée à partir de la prise en compte d'un certain nombre de jours d'autonomie à assurer pour une production photovoltaïque nulle. Ce nombre de jours varie suivant les applications et la situation géographique.

Il est de plus possible d'apporter les corrections suivantes :

- Correction due à la profondeur de décharge limitée entre 50% et 75% selon le constructeur.
- Correction due au rendement énergétique de la batterie (80%). La capacité du stockage en (Wh) est égale à :

$$E_{sto} = \frac{E_{ch} \cdot AUT}{DOD \cdot \eta_{bat}} \quad (\text{II.27})$$

AUT : Autonomie en jours

DOD : Profondeur de décharge (%)

$\eta_{bat}$  : Rendement de la batterie (%)

La capacité de stockage en ampère heure, est donnée par la relation suivante :

$$C_{sto} = E_{sto} / V_{nr} \quad (\text{II.28})$$

Nombre d'éléments en série est égal à :

$$N_{es} = V_{nr} / V_e \quad (\text{II.29})$$

$V_e$  : Tension nominale de l'élément batterie (V)

$V_{nr}$  : Tension nominale du régulateur (V)

Nombre de branches d'éléments en parallèle est égal à :

$$N_{tp} = C_{sto} / C_e \quad (II.30)$$

$C_e$  : Capacité d'un élément batterie (Ah), donnée par le constructeur.

Le nombre total d'éléments batterie est décrit par la relation suivante :

$$N_e = N_{es} \cdot N_{tp} \quad (II.31)$$

### 3) Dimensionnement du régulateur DC/DC

Après avoir calculé sa consommation d'électricité, la surface de modules photovoltaïques nécessaires pour la produire, et le nombre de batteries essentielles au stockage de cette énergie, il faut maintenant définir le régulateur de charge/décharge dont on a besoin pour optimiser la durée de vie de son équipement et permettre une charge adéquate. Le dimensionnement du régulateur se fait en fonction de la tension des modules solaires et des batteries ainsi que l'intensité maximale qu'ils peuvent générer. Une fois ces données recueillies, on pourra choisir une des technologies de régulation (shunt, série, PWM ou MPPT) et pour finir, on étudiera les options proposées telles qu'un écran LCD, une sonde de température autonome, etc...

Il existe deux types de régulateurs : les régulateurs de charge, et les régulateurs de charge/décharge. Les premiers sont les plus simples et les moins chers car ils ne contrôlent que la charge de la batterie. Les surcharges sont donc évitées, mais ils n'ont pas d'autre fonction. Ils peuvent toutefois convenir à une installation pour laquelle on est sûr de ne jamais épuiser complètement les batteries. Dans le cas contraire, les régulateurs de charge/décharge sont plus adaptés car ils permettent également d'éviter les décharges profondes en coupant l'alimentation de tout ou partie des appareils électriques.

**a-Tension d'entrée** : La tension du régulateur est imposée par celle des modules. Ceux-ci produisent l'électricité avec une tension de 12Vdc, 24Vdc et même jusqu'à 48Vdc. La "tension d'entrée" du régulateur doit donc être identique. Remarque : lorsque les modules sont connectés en série, c'est la tension obtenue qui nous intéresse.

Avec deux modules de 12Vdc en série, la tension d'entrée du régulateur sera donc de 24Vdc.

**b-Tension de sortie** : Il est rare que la tension de sortie soit différente de la tension d'entrée, mais certains régulateurs haut de gamme peuvent proposer ce choix. Si ce n'est pas le cas, la tension de sortie du régulateur, les batteries, le convertisseur de courant ou les appareils

électriques devront tous avoir la même tension que les modules, à savoir 12Vdc, 24Vdc ou 48Vdc.

**c- Intensité d'entrée** : Pour la connaître, il faut consulter la fiche technique des modules photovoltaïques. Il y est indiqué l'intensité maximale qu'ils sont capables de produire. Quand ils sont en parallèle, en faisant la somme de toutes les  $I_{max}$  de chaque module, on obtiendra l'intensité d'entrée que le régulateur doit pouvoir supporter. Quand ils sont en série, l'intensité d'entrée du régulateur est la plus petite de celle délivrée par les modules.

$$I_e = N_{PV_p} * I_{max-PV} \quad (II.32)$$

$N_{PV_p}$  : nbr de module PV en parallèle

**d- Intensité de sortie** : Cela ne concerne que les régulateurs contrôlant la décharge. La démarche est la même que pour l'intensité d'entrée, sauf qu'il faut additionner les intensités maximum que chaque appareil peut consommer.

$$I_s = \frac{\text{puissance consommée}(E)}{\text{tension de system}(U)} \quad (II.33)$$

#### 4) Dimensionnement de l'onduleur

Le convertisseur de courant se dimensionne en fonction de plusieurs critères :

**a. La tension d'entrée** : c'est la même que la tension des batteries ou du régulateur (12, 24 ou 48V DC).

**b. La tension de sortie** : en Algérie nous utilisons du 220/230 VAC, 50Hz

**c. La puissance nominale** : c'est la puissance dont les appareils qui consomment votre électricité ont besoin pour fonctionner de façon "normale". Pour connaître cette puissance nominale, il suffit de faire la somme des puissances des appareils électriques. Il faut toujours choisir un convertisseur dont la puissance est légèrement supérieure à celle des appareils.

**d. La puissance maximale** : l'onduleur est capable de fournir une grande puissance sur un court laps de temps (généralement 2 ou 3 fois la puissance nominale). Cette particularité est utile pour les appareils qui possèdent un moteur (réfrigérateur, micro-onde, lave-linge, ...), car leur

consommation augmente très fortement lors du démarrage. En général, si vous avez correctement dimensionné la puissance nominale, la puissance maximale est suffisante.

**e. La forme du signal** : la sinusoïde (l'onde) produite par le convertisseur peut avoir plusieurs formes (de la plus coûteuse à la moins chère : pur sinus, pseudo sinus ou carré). Certains appareils supportent très bien les ondes carrés, mais d'autres non. En revanche, n'importe quel appareil peut fonctionner avec une onde pur sinus.

### 5) Dimensionnement des câbles de connexions

Pour assurer le transport de l'énergie des modules jusqu'au régulateur de charge, on ne peut pas utiliser n'importe quel câble électrique. Les câbles solaires sont étudiés pour résister aux conditions spéciales liées à leur utilisation. Ils sont les seuls à pouvoir assurer une longue durée de vie (supérieure à 30 ans) tout en minimisant les pertes d'énergie. Les câbles ordinaires, même s'ils sont conçus pour un usage extérieur, ne supportent pas aussi bien les variations de température (pouvant aller de  $-20^{\circ}\text{C}$  à  $80^{\circ}\text{C}$  à proximité des modules), ainsi que l'exposition aux rayons ultra-violet et à l'ozone. Tout cela en restant souples et maniables. Ils sont équipés dans la majorité des cas d'une double isolation et ne possèdent pas de substances inflammables ou toxiques (halogène) ce qui accroît leur sécurité.

#### **a. La liaison électrique panneau-batterie**

Il s'agit de calculer la section de câble permettant de limiter à 0.48 V (4% de la tension nominale) la chute de tension maximale dans le câble de liaison, le panneau et la batterie étant distant de 15 mètres environ.

Le courant maximal qui sera délivré à la batterie est donc de l'ordre de 10A (160 W maximal) sous une tension optimale de 14 V environ.

La résistivité du cuivre est de  $1.810^{-8}\Omega/m$ . Si on appelle  $\Delta U_{\max}$  la chute de tension maximale, elle s'écrit en fonction du courant  $I_{\max}$  :

$$\Delta U_{\max} = R * I_{\max} \quad (\text{II.30})$$

#### **b. Résistance d'un câble électrique**

La résistance d'un câble électrique ne dépend ni de la tension ni de l'intensité du courant qui le traverse, mais dépend de la résistivité ( $\rho$ ) des matériaux utilisés (cuivre, argent, fer, ...), de la longueur du câble, de sa section, et de la température. Le cuivre est de loin le conducteur le plus

utilisé, et sa résistivité oscille entre  $16 \times 10^{-9}$  à  $0^\circ\text{C}$  et  $17 \times 10^{-9}$  à  $25^\circ\text{C}$ . L'équation permettant de connaître la résistance est la suivante :

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (\text{II.34})$$

Avec la résistance R en ohm ( $\Omega$ )

La résistivité  $\rho$  en ohm mètre ( $\Omega \cdot \text{m}$ ), La longueur du câble L en mètre (m), et la section du câble s en mètre-carré ( $\text{m}^2$ )

La résistance est essentiellement proportionnelle à la longueur et à la section du câble (une longueur 2 fois plus grande multiplie par 2 la résistance, et une section 2 fois plus grande la divise par 2)

**D'où :**

$$R = \frac{\Delta U_{\max}}{I_{\max}} = \rho \frac{L}{S} \quad (\text{II.35})$$

Qui permet de tirer la section du câble S :

$$S = \rho L * \frac{I_{\max}}{\Delta U_{\max}} \quad (\text{II.36})$$

La section du câble devient vite très importante et donc son prix aussi. Il est par conséquent, nécessaire de faire un compromis entre un coût raisonnable du câble, et les pertes en ligne (afin de ne pas sur-dimensionner le panneau).

### c. Réduire les pertes et la chute de tension dans un câble électrique

Pour conserver une efficacité optimale, nous essayons en général de limiter la perte à 3%, par conséquent il existe plusieurs solutions pour y parvenir.

- Limiter la distance parcourue par le courant, la solution la plus économique.
- Augmenter la section des câbles électriques, néanmoins cela représente un cout à prendre en compte.
- Réduire l'intensité dans les câbles électriques en augmentant la tension.
- Limiter la chaleur dans les câbles mais le gain est minime.



- Limiter la distance parcourue par le courant.

Ici rien de bien compliqué, il vous suffit de réduire au maximum la distance entre votre source d'énergie et la consommation de cette énergie. Dans le cadre d'une utilisation sur batterie, la batterie devra être placée le plus près possible des éléments qui vont consommer le courant.

- Augmenter la section des câbles électriques.

L'avantage énorme de cette solution est qu'il est possible de considérablement réduire la perte de courant dès lors qu'on augmente la section des câbles électrique néanmoins le cout peut s'avérer important si l'intensité consommée est élevée ou si la distance est importante. A réserver pour des distances moyennes de 10m maximum selon nos calculs.

- Réduire l'intensité dans les câbles électriques.

Il existe 2 solutions très simples :

La première consiste à mettre autant que possible vos appareils en parallèle depuis la source d'énergie car au lieu d'avoir une consommation de 100w sur un câble électrique vous pouvez passer par exemple à 4 X 25 watts sur 4 câbles différents. Cela entraine un surcout au niveau de la longueur des câbles puisqu'il vous faudra 4 X plus de longueur, il faut donc faire un calcul de cout entre section supérieure ou longueur supérieure.

La seconde solution consiste à augmenter la tension (le voltage) en amont, c'est à dire qu'au lieu de partir sur du 12v on partira par exemple en 48v et il ne vous reste plus qu'à mettre vos appareils en série pour atteindre cette tension soit 4 appareils 12v en série sur un départ en 48v. L'inconvénient étant que via un système solaire + batterie il est assez difficile de trouver des panneaux et batteries fonctionnant en 48v et encore faut-il que vos appareils acceptent la mise en série. A réserver à ceux qui ont des notions en électricité.

### III.6. Application de dimensionnement

#### Energie consommée

$$E_c = (20 \cdot 4) + (45 \cdot 5) + (1400) + (2500 \cdot 7) + (60 \cdot 6) + (20 \cdot 5) + (12 \cdot 24) + (600) + (700) + (190 \cdot 12) + (20 \cdot 6) + (110 \cdot 2) + (40)$$

$E_c = 23913 \text{ Wh}$
--------------------------

**Energie produite**

$$E_p = E_c / K$$

K : coefficient des pertes =0.7

$$E_p = 23913 / 0.7$$

$$E_p = 34161.4 \text{ Wh}$$

**La puissance crête**

$$P_c = E_p / I_r$$

$I_r$  : irradiation globale =5kWh/m<sup>2</sup>/j

$$P_c = 34161.4 / 5$$

$$P_c = 6832.3 \text{ Wc}$$

**Nombre de panneaux** ( $P_n = 250 \text{ W}$ )

$$\text{Nbr} = P_c / P_n \quad \text{Nbr} = 6832.3 / 200$$

$$\text{Nbr} = 28 \text{ Panneaux}$$

**Batteries**

$$C = N \cdot E / D \cdot U$$

$$C = 4981.9 \text{ Ah}$$

Avec : N=nbr d'autonomie (4jr)

E=besoin énergétique

D=profondeur de décharge (80%)

U=tension nominale du système (24V)

$$\text{Nbr}_{\text{Batteries}} = C / 200$$

$$\text{Nbr}_{\text{Batteries}} = 25 \text{ Batteries}$$

**Régulateur**

$$I_e = K \cdot I_m \quad I_m = P / U$$

$$I_e = 291.6 \text{ A}$$

$$I_m = 10.41 \text{ A}$$

K : nbr de panneaux en parallèle

$$\text{Consommé} = 5717 \text{ W}$$

$$I_s = C_{\text{consommé}} / S_{\text{système}}$$

$$I_s = 238 \text{ A}$$

### L'onduleur

L'onduleur dépend de :

- la tension d'entrée est celle du parc des batteries =24V
- la tension de sortie est celle des charges (appareils) =220V

### Les câbles de connexions

$$S = (\rho \cdot 2L \cdot I) / \Delta U$$

$\Delta U$  : la chute de tension ( $24 \cdot 0.02 = 0.48$ )

$\rho$  : la masse volumique du conducteur

L : la distance

Câbles entre le générateur et les batteries :

$$S = (1.6 \cdot 10^{-8} \cdot 2 \cdot 5 \cdot 10.41) / 0.48$$

$$S = 3.48 \text{ mm}^2$$

$$\rho = 1.6 \cdot 10^{-8}$$

$$L = 5 \text{ m}$$

$$I = 10.41 \text{ A}$$

Câbles entre les batteries et l'onduleur :

$$S = (1.6 \cdot 10^{-8} \cdot 2 \cdot 5 \cdot 11.4) / 0.48$$

$$S = 3.8 \text{ mm}^2$$

$$\rho = 1.6 \cdot 10^{-8}$$

$$L = 5 \text{ m}$$

$$I = 11.4 \text{ A}$$

## II.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons commencé par présenter la maison solaire sur laquelle nous allons faire notre étude, par la suite une présentation de la demande énergétique a été faite avec les profils de consommations journaliers et hebdomadaires de l'habitat pour chaque saison. Ensuite nous avons présenté la modélisation des différents composants de système PV. Finalement nous avons présenté les étapes du dimensionnement avec une application afin d'élaborer notre algorithme de gestion d'énergie qui sera le but du chapitre suivant.

# **Chapitre III**

## **Résultats de simulation et discussions**

### III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons étudier le cas d'une maison solaire alimentée par un système PV connecté au réseau, avec une gestion d'énergie pour minimiser le coût de la consommation énergétique de la maison.

Nous avons choisi deux journées une en été et l'autre au printemps pour faire les études et les tests, afin de tester le scénario de gestion d'énergie proposé, les étapes suivantes seront présentées :

- Proposition d'une stratégie de gestion des charges qui tient en compte toutes les entrées introduites dans cette gestion à savoir, le profil de consommation, la production de la puissance maximale issue des panneaux PV.
- Programmation de la gestion de l'énergie proposée dans le système PV proposé.

Les résultats de simulation obtenus, en utilisant le MATLAB-Simulink seront présentés et interprétés.

### III.2. Stratégie de gestion utilisée

La gestion d'énergie est un aspect primordial pour tout type de système photovoltaïque qu'il soit connecté au réseau, multi-sources ou autonome.

L'optimisation du dimensionnement d'un système photovoltaïque est une question complexe. Un compromis doit être trouvé entre avoir une bonne qualité d'approvisionnement énergétique et un coût économique acceptable pour le consommateur.

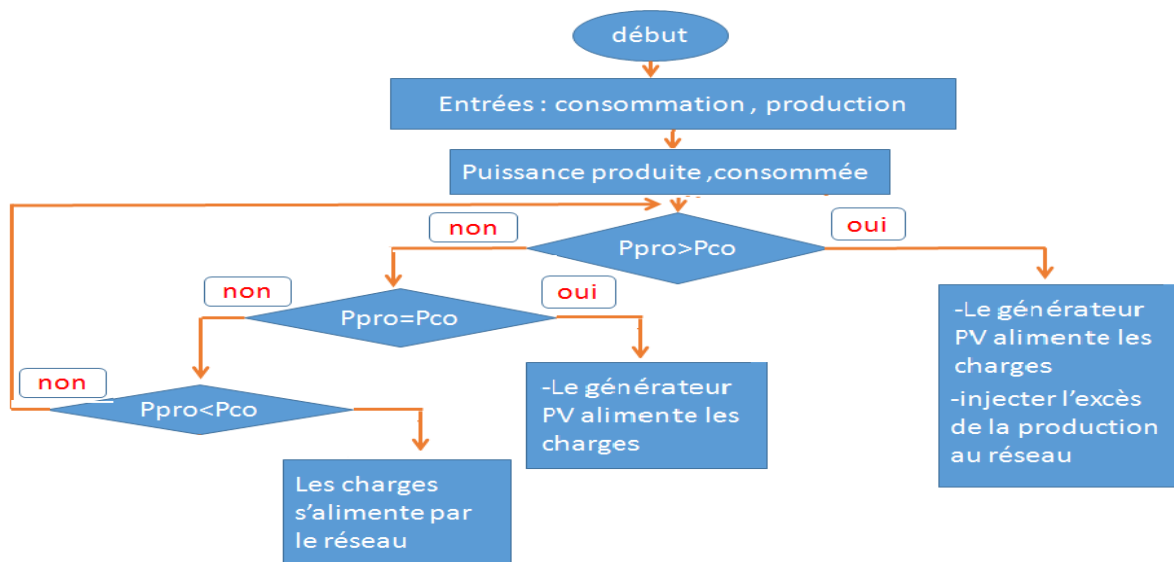
La solution consiste en une gestion de l'énergie afin de répondre à ces contraintes et pour créer l'équilibre entre la production et la consommation de l'énergie.

Dans notre travail, nous allons baser sur la gestion des charges qui consiste à décaler temporellement des différentes charges électriques de façon à éviter les pics de puissances dans la journée, comme nous avons déjà montré dans le chapitre I (I.9).

#### III.2.1. Stratégie de la gestion des charges

Cette gestion nous a permis d'utiliser un nombre de modules PV inférieur par rapport à un dimensionnement classique, dans le but de satisfaire les besoins énergétiques des équipements électroménagers de la maison.

La gestion des charges se base sur l'organisation de la consommation de sorte d'avoir un profil stable et bien déterminé pour connaître le maximum d'énergie qu'on a besoin dans chaque instant. Ceci est basé sur le développement et l'organisation du fonctionnement des appareils utilisés. Pour répondre à ces besoins, nous devons juste installer une puissance qui est égale à la valeur du pic de consommation. L'organigramme suivant présente la gestion d'énergie proposé.



**Organigramme : gestion proposé**

### III.3. Système photovoltaïque connecté au réseau

La figure III.1 montre l'enchaînement des équipements qui forme un système photovoltaïque connecté au réseau.

Ce dernier est le plus pratique et fiable qu'un système autonome. Surtout dans les villes et les sites urbains (ou il y a le réseau public), car le système autonome avec les batteries coûte cher et qui sont toxiques ainsi qu'il faut les entretenir en ajoutant de l'acide et de l'eau distillée. En plus de ça, il est strictement interdit en Algérie et dans la majorité des pays du monde d'utiliser les batteries dans un système photovoltaïque connecté au réseau, car ça donne la possibilité de tricher ( nous pouvons acheter de l'énergie pour charger les batteries via le réseau public avec un prix précis puis on la décharge en injectant au réseau avec le double prix).



Figure III.1 : Système PV étudié (système PV On-Grid)

III.3.1. Description du system étudié sous Matlab/Simulink (connecté au réseau)

Le système étudié est constitué d’un générateur PV de 3.5KWh en utilisant 2 branches en séries de 6 modules en parallèles, le contrôle Maximum Power Point Tracking (MPPT) prend la puissance maximale du panneau solaire un convertisseur DC/DC (Boost)

Le réseau électrique est relié à la maison à partir d’un transformateur de distribution sur poteau, il est connecté à la maison par la commande du convertisseur DC/AC (l’onduleur). La figure III.2, présente le bloc Simulink du système PV avec la gestion d’énergie.

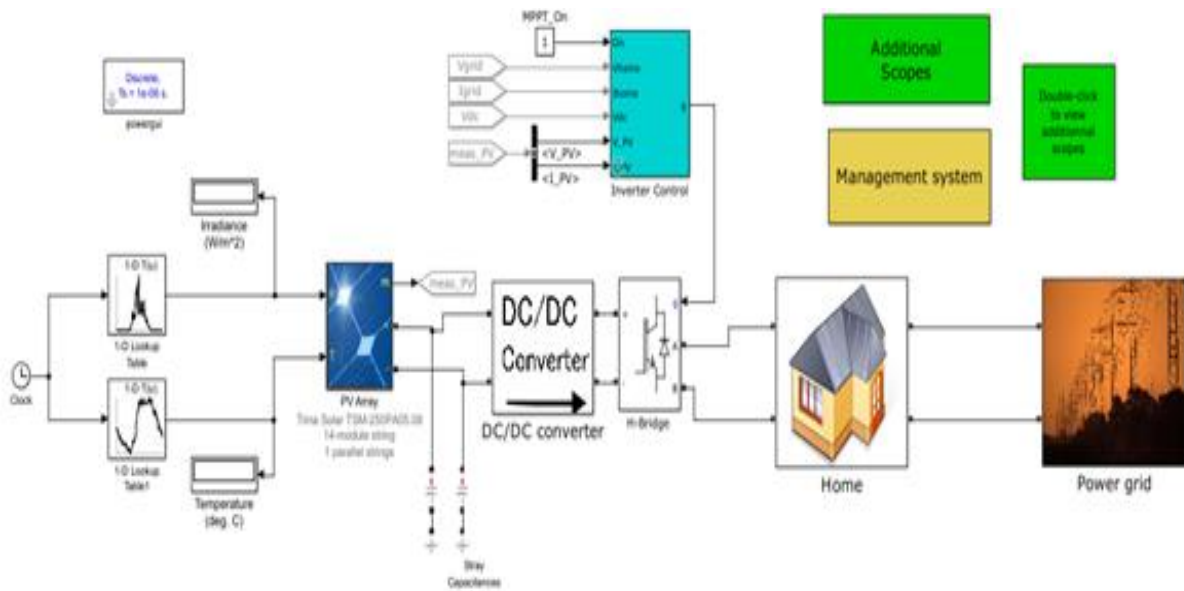


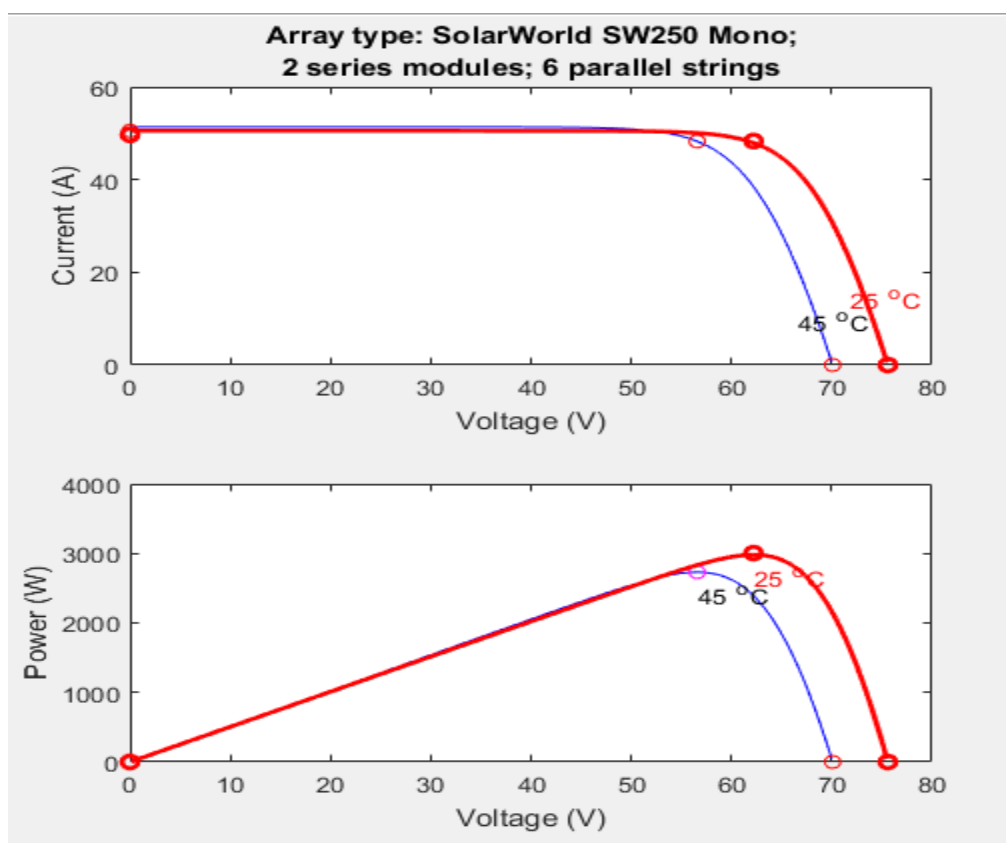
Figure III.2 : Le bloc Simulink du système PV avec gestion d’énergie

➤ Paramètres du module photovoltaïque

Le profil de production présente la quantité d’énergie produite par le générateur photovoltaïque que nous avons utilisé dans les conditions initiales proposé. Les caractéristiques du générateur photovoltaïque utilisé sont présenté dans le tableau III.1 et la figure III.3.

Module data			
Module:	SolarWorld SW250 Mono		
Maximum Power (W)	250.355	Cells per module (Ncell)	60
Open circuit voltage Voc (V)	37.8	Short-circuit current Isc (A)	8.28
Voltage at maximum power point Vmp (V)	31.1	Current at maximum power point Imp (A)	8.05
Temperature coefficient of Voc (%/deg.C)	-0.36399	Temperature coefficient of Isc (%/deg.C)	0.085

**Tableau III.1 :** Caractéristiques des modules PV utilisés



**Figure III.3 :** Caractéristiques I-V et P-V

Le modèle mathématique du module photovoltaïque utilisé pour la simulation est présenté au chapitre 2 par la figure II.13 et les équations (III.1), (III.2) et (III.3).

Les valeurs des paramètres de ce modèle sont :

- La résistance parallèle :  $R_p=30 \Omega$



- La résistance série :  $R_s=30.10^{-3}\Omega$
- L'énergie de Gap  $E_g=1.1\text{ eV}$  ;
- Le nombre de cellules  $N_{br}= 72$  cellules ;
- Caractéristiques des deux diodes :

$n_1 = 1$  ;  $n_2 = 2$  ;  $K_1 = 1,2\text{ A/cm}^2$   $K_3$ .  $K_2= 2,9.10^5\text{ A/cm}^2.K_5/2$ .

#### ➤ Paramètres du convertisseur Boost

Le modèle mathématique du convertisseur Boost utilisé pour la simulation est donné au chapitre 2 par la figure II.14.

Les valeurs calculées de différents composants du convertisseur Boost sont :

$L=3.5\text{mH}$ ,  $C_1=5.6\text{mF}$ ,  $C_2=5.6\text{mF}$ , Frequency=5 kHz, Switch(S) =IRFP360, Diode (D) =UF5402

Le convertisseur de puissance DC-DC de 5 kHz augmente la tension de la tension naturelle PV (273 V cc à puissance maximale) à 500 V DC. Le cycle de commutation est optimisé par un contrôleur MPPT qui utilise la technique «Régulateur intégral Conductance + Intégralité». Ce système MPPT modifie automatiquement le rapport cyclique afin de générer la tension requise pour extraire la puissance maximale.

#### ➤ Paramètres du convertisseur DC/AC

Le modèle mathématique du convertisseur DC/AC utilisé pour la simulation est donné au chapitre 2 par la figure II.16 et l'équation (II.14).

Les caractéristiques de ce convertisseur DC/DC sont :

220/230 VAC, 50Hz et 500W de puissance.

#### ➤ Paramètres du réseau électrique

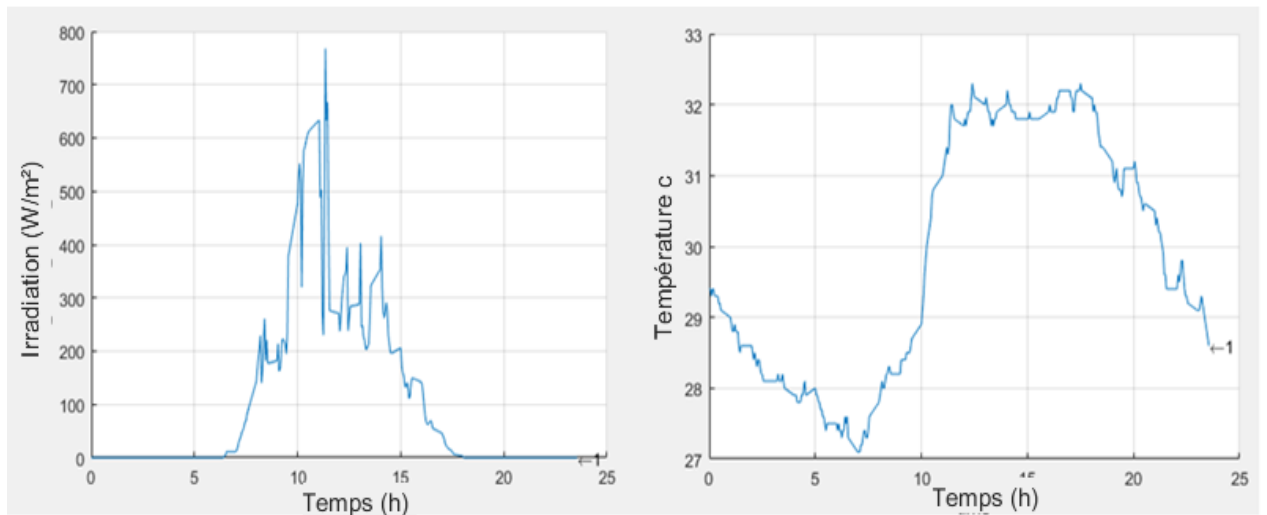
Les caractéristiques du réseau électrique sont :

- Transformateur de couplage triphasé 100 KVA 260V / 25KV.
- Réseau utilitaire (alimentation de distribution de 25 KV + système de transmission équivalent de 120 KV).

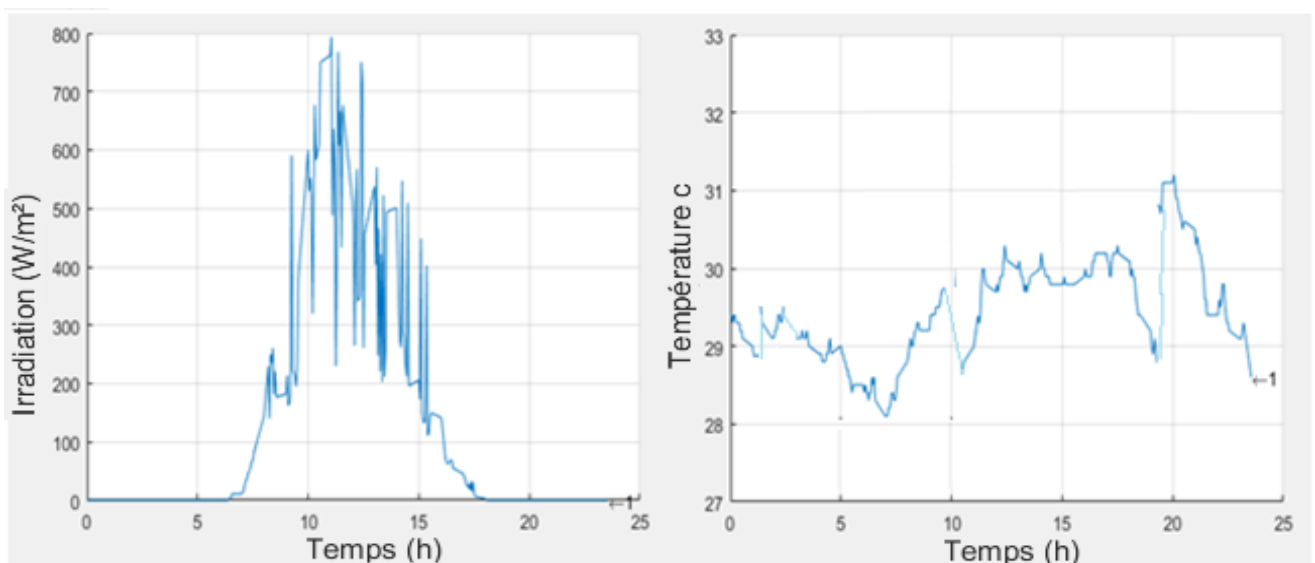
### III.3.2. Production énergétique du système

#### III.3.2.1. Profils d'irradiation et température

Les entrées du générateur PV sont l'irradiation et la température qui ont été acquises via la station météorologique installée à l'unité de développement des équipements solaires à Bou-Ismaïl. La figure III.5 présente un profil d'irradiation de la journée de (28-03-2016) au printemps. La figure III.6 présente un profil d'irradiation de la journée de (07-07-2016) en été.



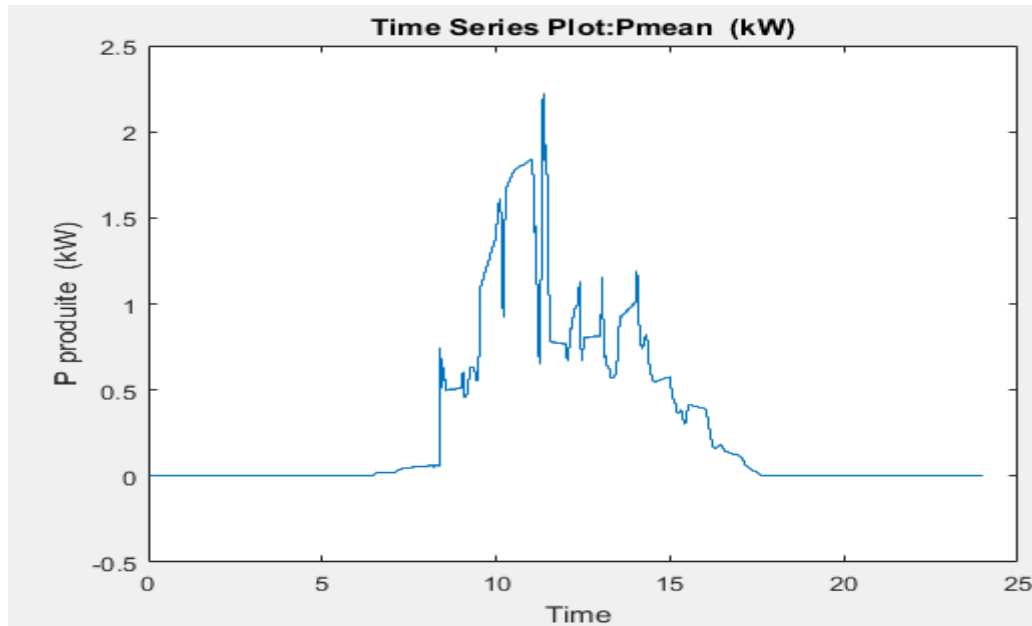
**Figure III.4 :** Profil d'irradiation et de température au site de l'UDES (Bou-Ismaïl)  
le 07-07-2016



**Figure III.5 :** Profil d'irradiation et de température au site de l'UDES (Bou-Ismaïl)  
le 28-03-2016

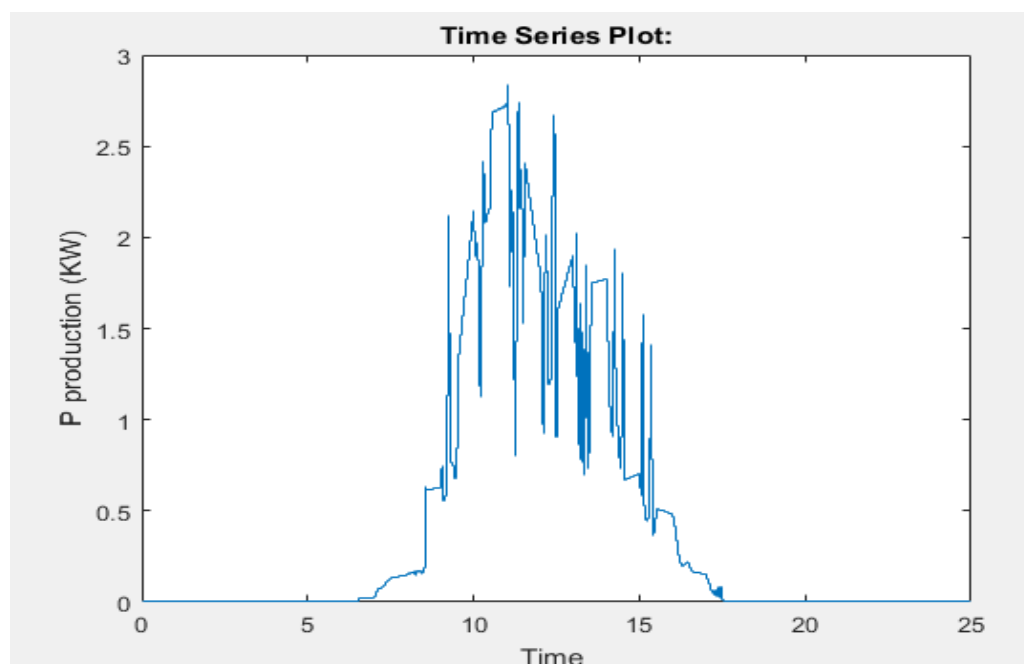
### III.3.2.2. Profils de production

La production d'énergie de ce panneau est présentée dans la figure III.7 pour l'été et la figure III.8 pour le printemps.



**Figure III.6 :** puissance produite par le panneau PV en été

On remarque bien que la production a dépassé les 2.3 KW entre 11h et midi exactement où il fait le pic d'irradiation.



**Figure III.7 :** puissance produite par le panneau PV en printemps

### III.3.3. La demande énergétique de la maison

Pour concevoir le système d'alimentation photovoltaïque le plus efficace pour alimenter l'habitation, il faut connaître les ressources énergétiques solaires d'un site et la consommation d'énergie du ménage.

La demande d'énergie d'un foyer dépend de nombreux facteurs tels que le nombre d'appareils utilisés, la puissance électrique consommée par chaque appareil et la quantité d'utilisation d'appareils déterminés par le comportement des occupants de la maison. Comme c'est déjà montré dans le chapitre 2.

maison	equipement	puissance	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
sejour	climatiseur (Load 2)	2500		2500				2500								2500	2500	2500						2500	2500	
	tele-démo (Load 1)	60													60	60			60	60	60			60	60	
	lampe (Load 9)	20							20	20												20	20	20		
	modem (Load 3)	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	
chambre	lampe (Load 9)	20							20	20														20	20	
	laptop (Load 4)	45,03													45	45						45	45,03	45,03		
	faire a repasé (Load 5)	1400														1400										
cuisine	machine a laver (Load 6)	600										600														
	micro-onde (Load 7)	700								700																
	lapme (Load 9)	20																				20	20	20		
	refregerateur (Load 8)	190	190		190	190		190	190	190	190	190		190		190		190	190	190	190	190	190	190		
	hotte (Load 10)	110											110										110			
sanitaire	lampe (Load 9)	20								20															20	
	lampe (Load 9)	20								20															20	
total			202	2512	202	12	202	2512	242	792	202	612	202	122	307	2614	4102	2512	202	72	262	72	397	2597	2867	132

Figure III.8 : consommation énergétique journalière de la maison solaire en été

maison	equipement	puissance	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
sejour	tele-démo	60													60	60			60	60	60			60		
	lampe	20							20	20												20	20	20		
	modem	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	
chambre	lampe	20							20	20														20	20	
	laptop	45,03													45	45						45,03	45,03	45,03		
	faire a repas	1400														1400										
cuisine	machine a la	2000										600														
	micro-onde	700								700																
	lapme	20								20												20	20	20		
	refregerateu	190	190		190	190		190	190	190	190	190		190		190		190	190	190	190	190	190	190		
	hotte	110												110										110		
sanitaire	lampe	20								20															20	
	lampe	20								20															20	
total			202	12	202	12	202	12	242	792	202	612	202	122	307	117	1602	12	202	72	262	112	397	157	277	132

Figure III.9 : consommation énergétique journalière de la maison solaire en printemps

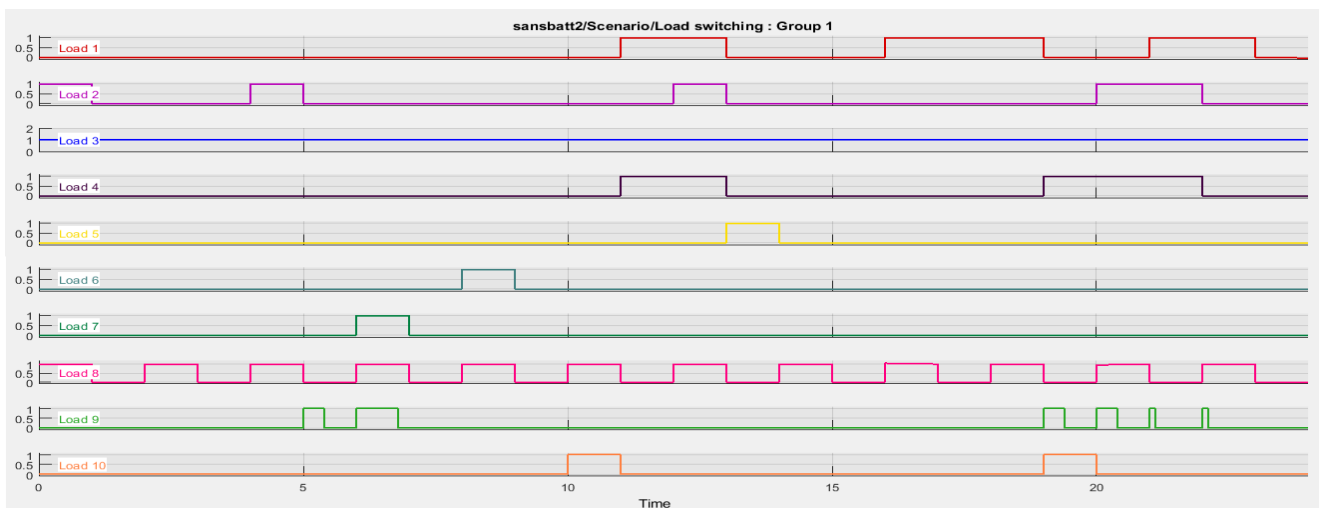
Les figures (III.9 et III.10) montrent les consommations énergétiques de la maison dans une période de 24h de deux jours différent, un en été et l'autre en printemps.

On remarque bien que le pic de consommation en été qui est de 4.1KW à 14h et supérieur de celle du printemps qui est de 1.6KW à 14h aussi.

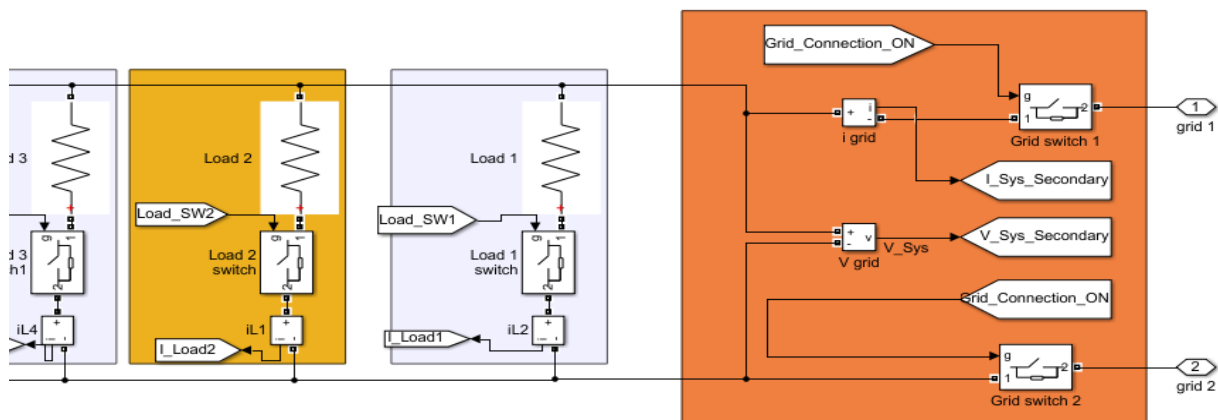
Cela est dû à l'utilisation du climatiseur qui consomme une puissance de 2500W.

**1- Le fonctionnement des appareils électroménagers utilisés**

Le fonctionnement des appareils électroménagers considérés dans ce travail sont énumérés dans la (figure III.10) qui présente le pic qui appartient à chaque équipement pour le rendre en marche ou pour l'éteindre au temps qu'on a défini dans la (figure III.8 et 9).



**Figure III.10 :** répartition de fonctionnement et de l'arrêt des appareils de la maison en fonction du temps (h)



**Figure III.11 :** Description des charges utilisées sous Matlab-Simulink

La figure III.11 délivre une impulsion au chaque charge qui permet d'ouvrir ou fermer l'interrupteur pour rendre la charge éteindre ou en marche.

Le volt et l'ampère qui sont dans la figure III.12 nous permet de connaître la puissance délivrée par le réseau public en multipliant le courant du réseau par sa tension.

## 2- Profil de consommation de chaque appareil

Les figures suivantes vont présenter les profils de consommation de chaque appareil durant une journée, le profil total de consommation et la puissance du réseau.

- **Charge 1 (démon-télévision) :** la figure III.12 montre le fonctionnement du démon-télévision durant la journée (24h).

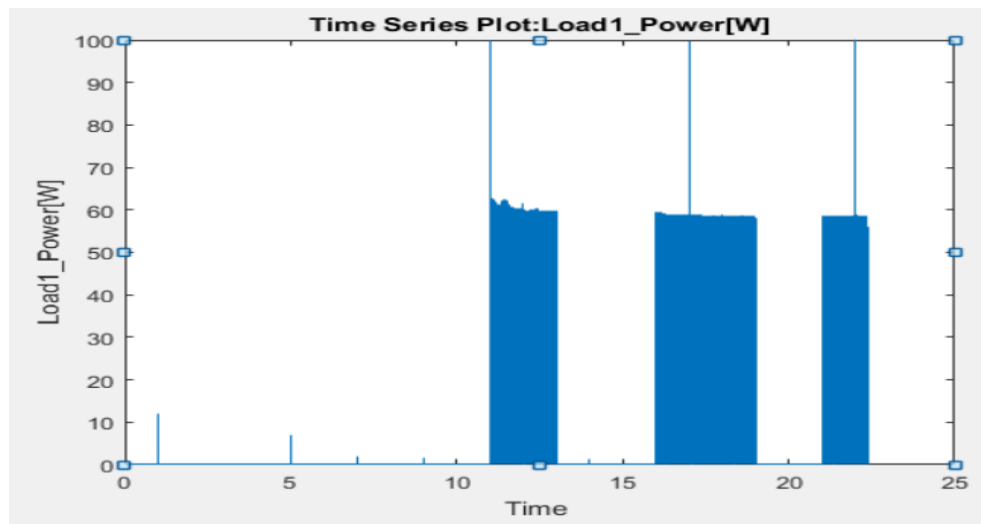


Figure III.12 : puissance consommée du démon-télévision

- **Charge 2 (Climatiseur) :** la figure III.13 montre le fonctionnement du climatiseur durant la journée (24h).

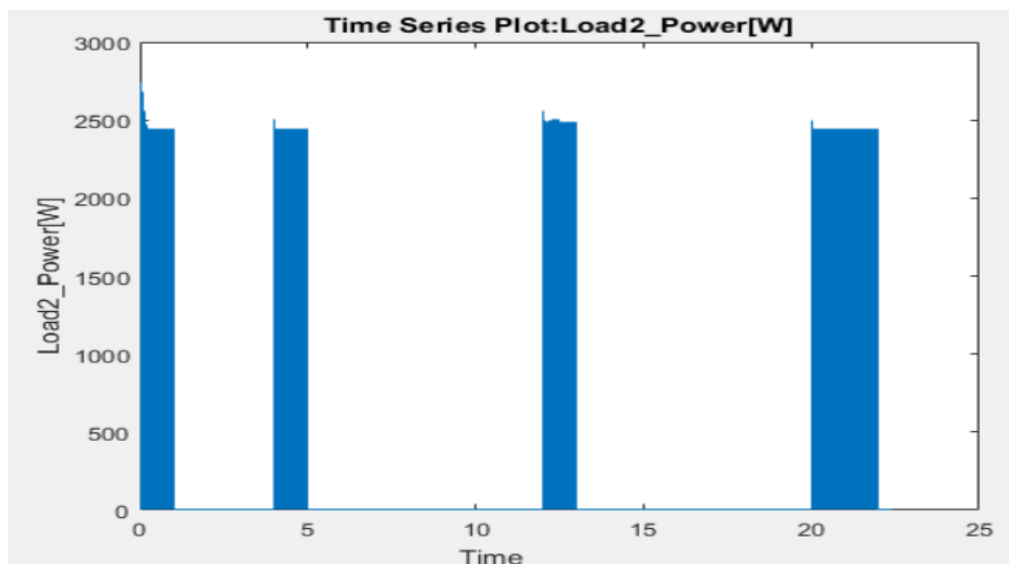


Figure III.13 : puissance consommée du climatiseur

- **Charge 3 (Modem) :** la figure III.14 montre le fonctionnement du modem durant la journée (24h).

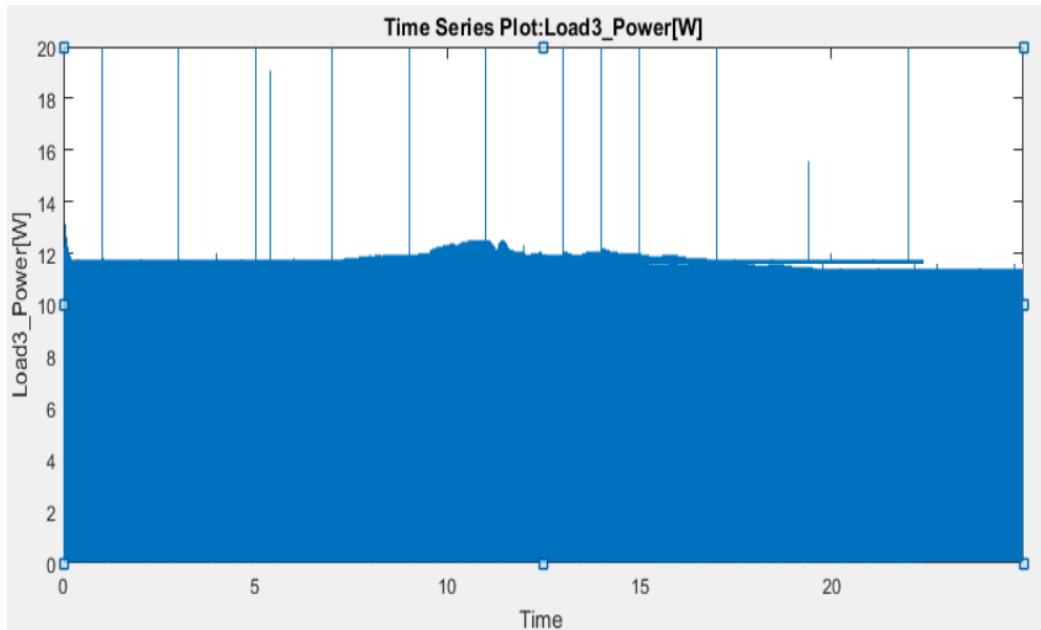


Figure III.14 : puissance consommée du modem

- **Charge 4 (Laptop) :** la figure III.15 montre le fonctionnement du laptop durant la journée (24h).

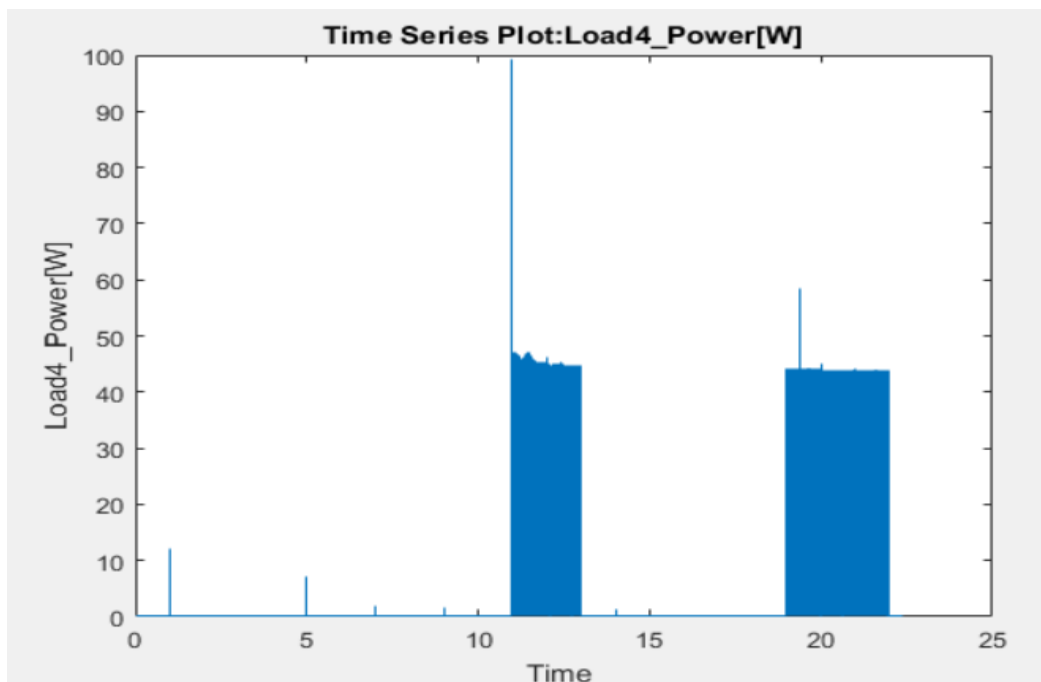
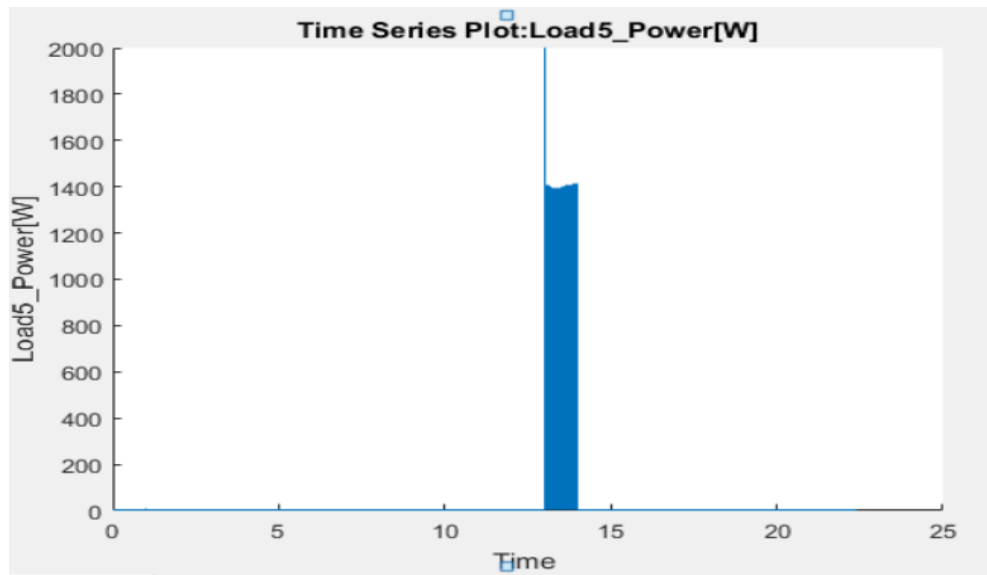


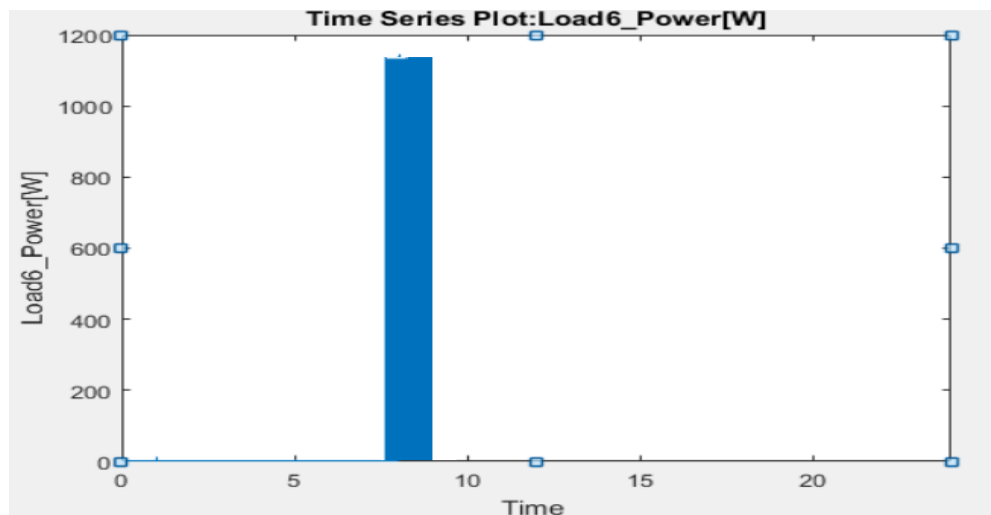
Figure III.15 : puissance consommée du laptop

- **Charge 5 (Fer à repassé) :** la figure III.16 montre le fonctionnement du fer à repassé durant la journée (24h).



**Figure III.16 :** puissance consommée du fer à repassé

- **Charge 6 (Machine à laver) :** la figure III.17 montre le fonctionnement de la machine à laver durant la journée (24h).

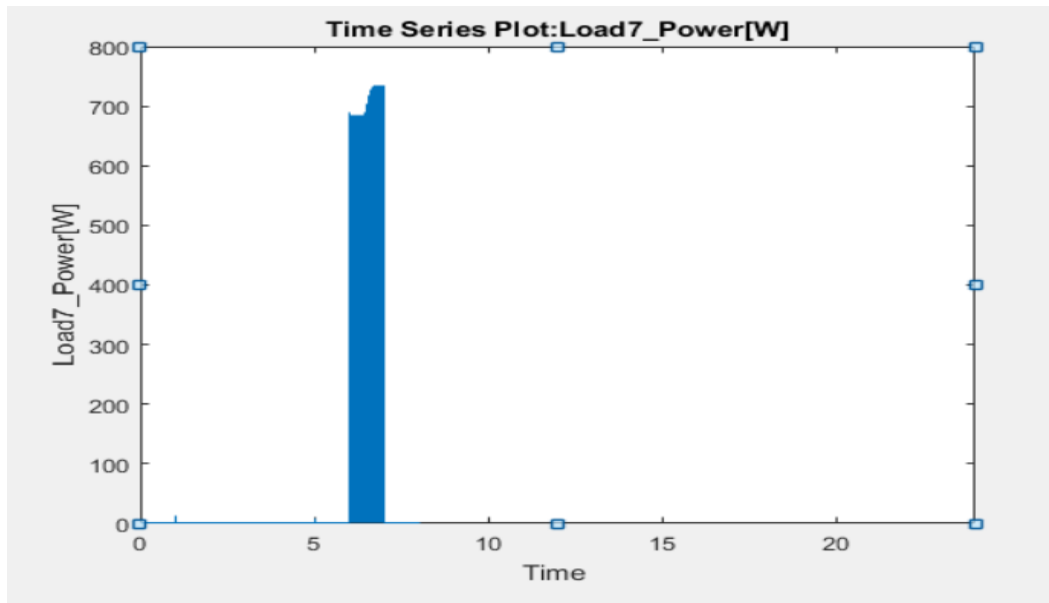


**Figure III.17 :** puissance consommée de la machine à laver

La machine à laver et le fer à repassé ont été programmée à fonctionnée entre 9h et 12h pour profiter des moments ou la production PV est maximale, car ces deux équipements consomme une grande puissance par rapport aux autres appareils et nous l'avons besoins toute l'année. Ce décalage temporelle sa fait partie de la gestion des charges utilisée.

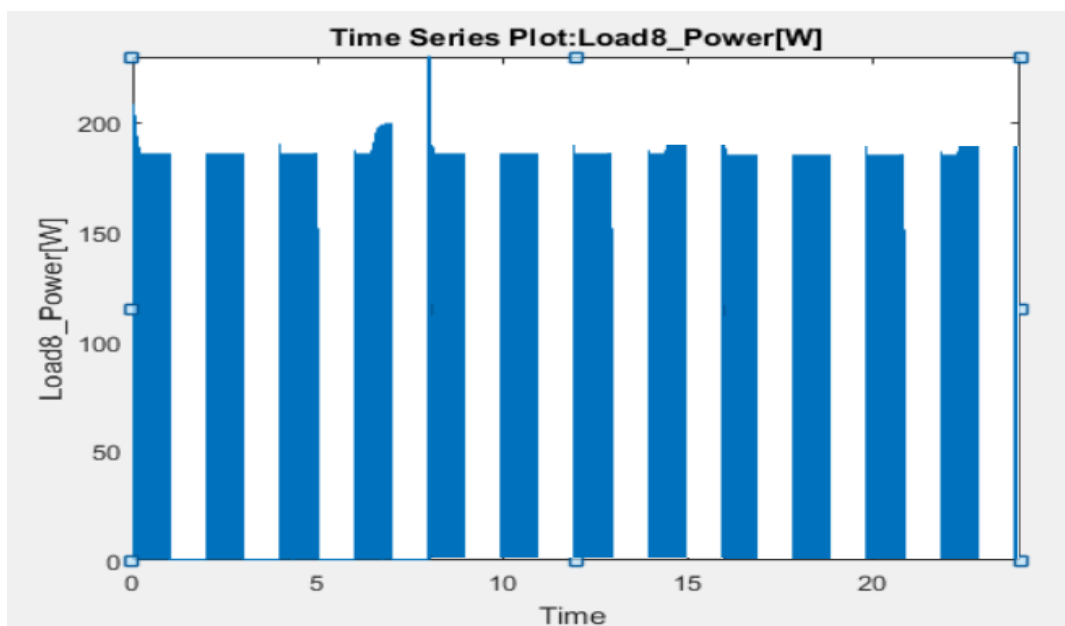


- **Charge 7 (Micro-onde) :** la figure III.18 montre le fonctionnement du micro-onde durant la journée (24h).



**Figure III.18 :** puissance consommée du micro-onde

- **Charge 8 (Réfrigérateur) :** la figure III.19 montre le fonctionnement du réfrigérateur durant la journée (24h).



**Figure III.19 :** puissance consommée du réfrigérateur

- **Charge 9 (Lampes) :** la figure III.20 montre le fonctionnement des lampes durant la journée (24h).



Figure III.20 : puissance consommée des lampes

- **Charge 10 (La hotte) :** la figure III.21 montre le fonctionnement de la hotte durant la journée (24h).

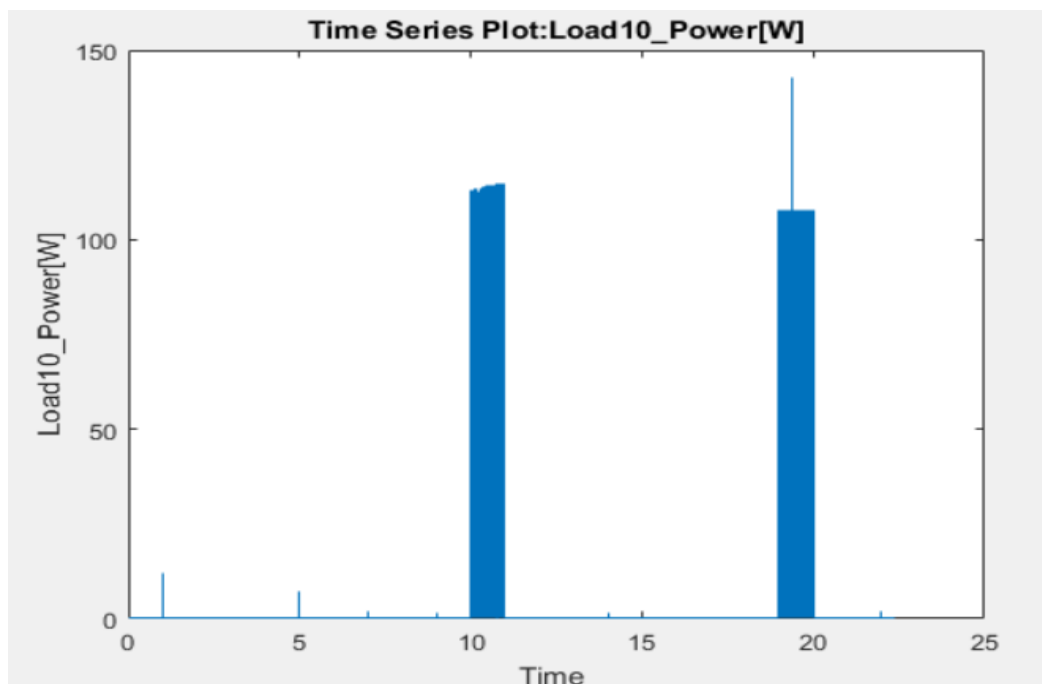


Figure III.21 : puissance consommée de la hotte

La somme des puissances précédentes nous donne le profil de consommation journalier qui est présenté dans la figure III.22 pour l'été et la figure III.23 pour le printemps.

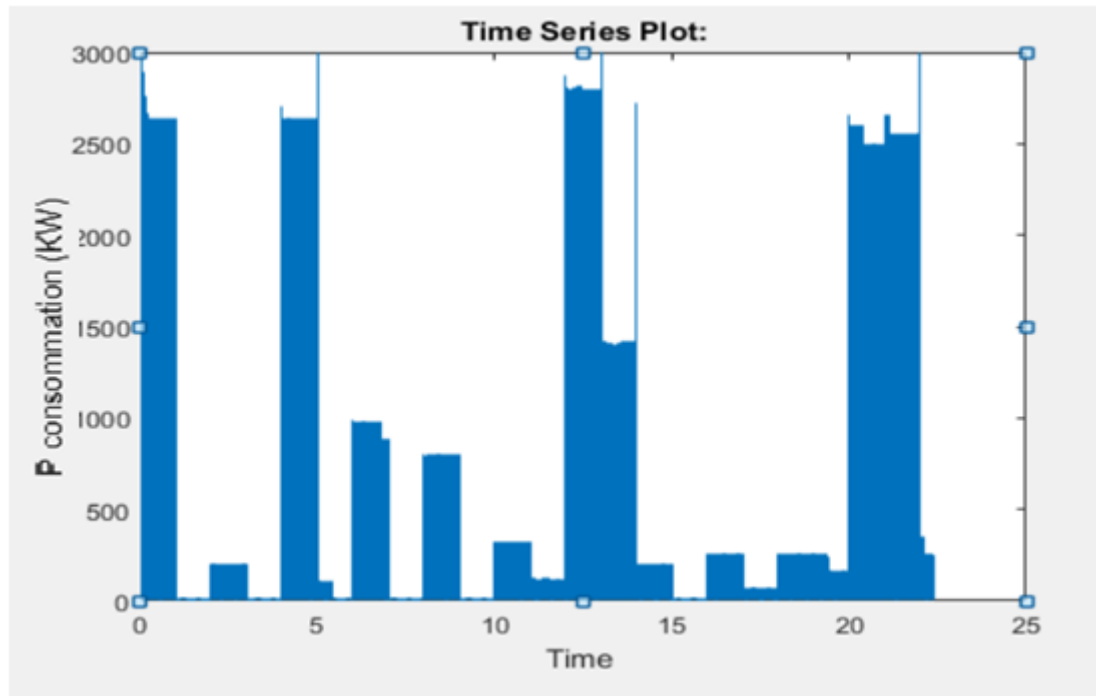


Figure III.22 : profil total de consommation journalière de la maison solaire en été

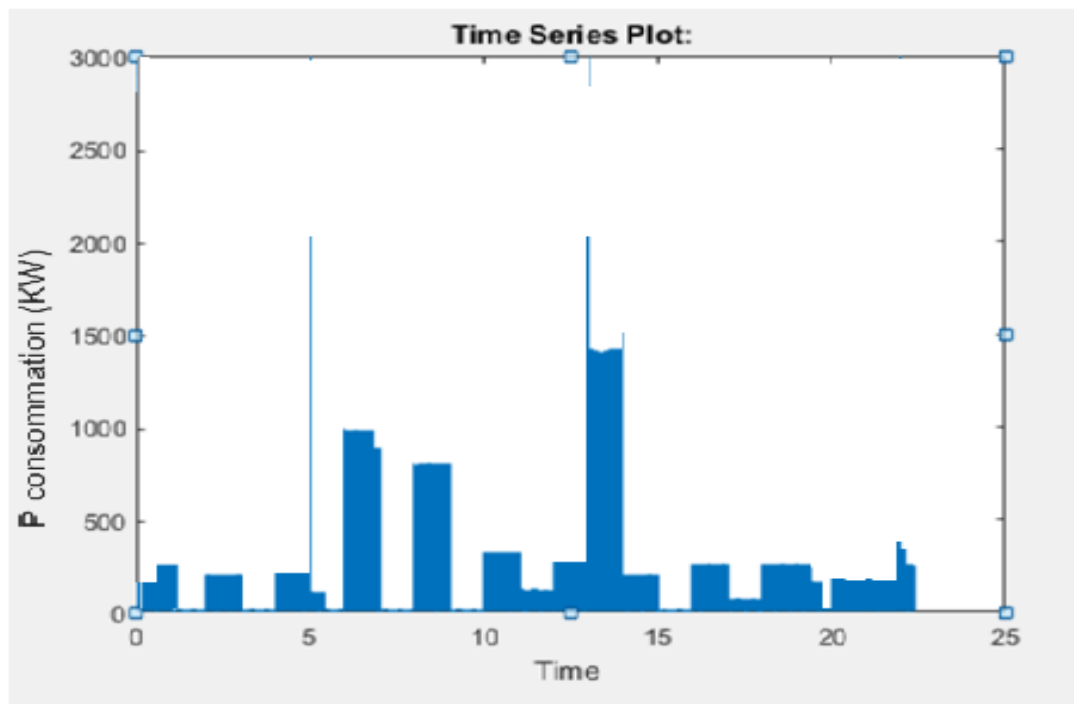


Figure III.23 : profil total de consommation journalière de la maison solaire en printemps

La puissance du réseau représente la quantité d'énergie prise du réseau et la quantité d'énergie injectée dans le réseau, comme le montre la figure III.24 pour l'été et la figure III.25 pour le printemps.

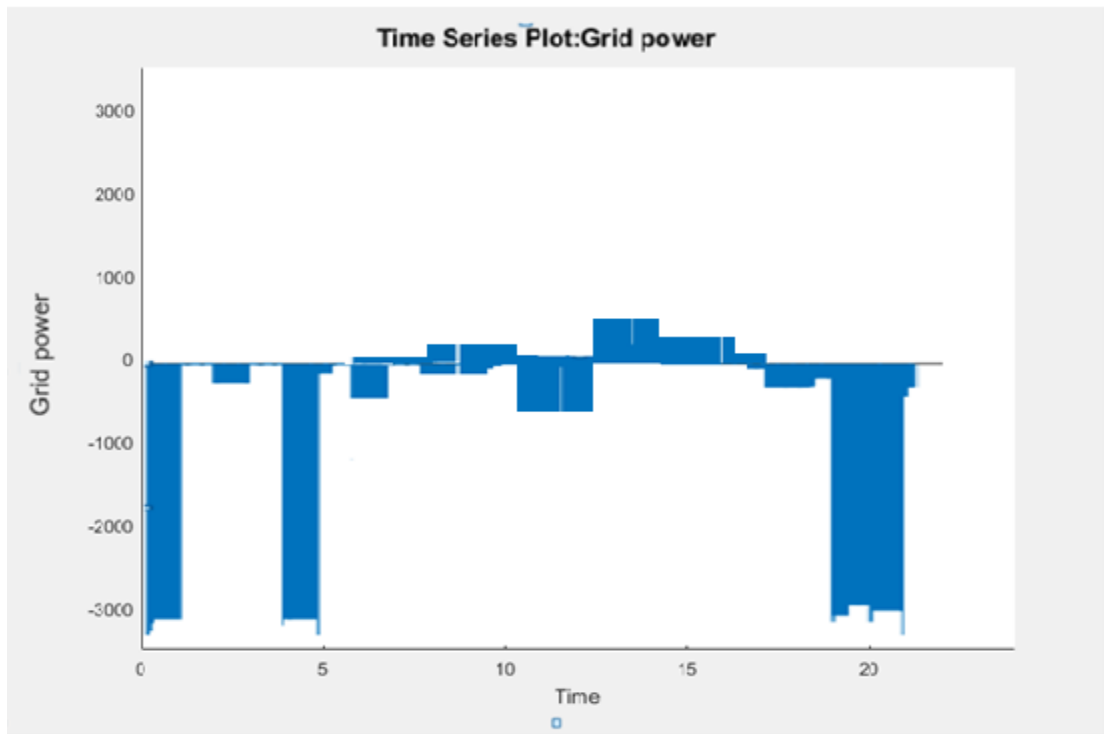


Figure III.24 : puissance de sortie du réseau électrique en été

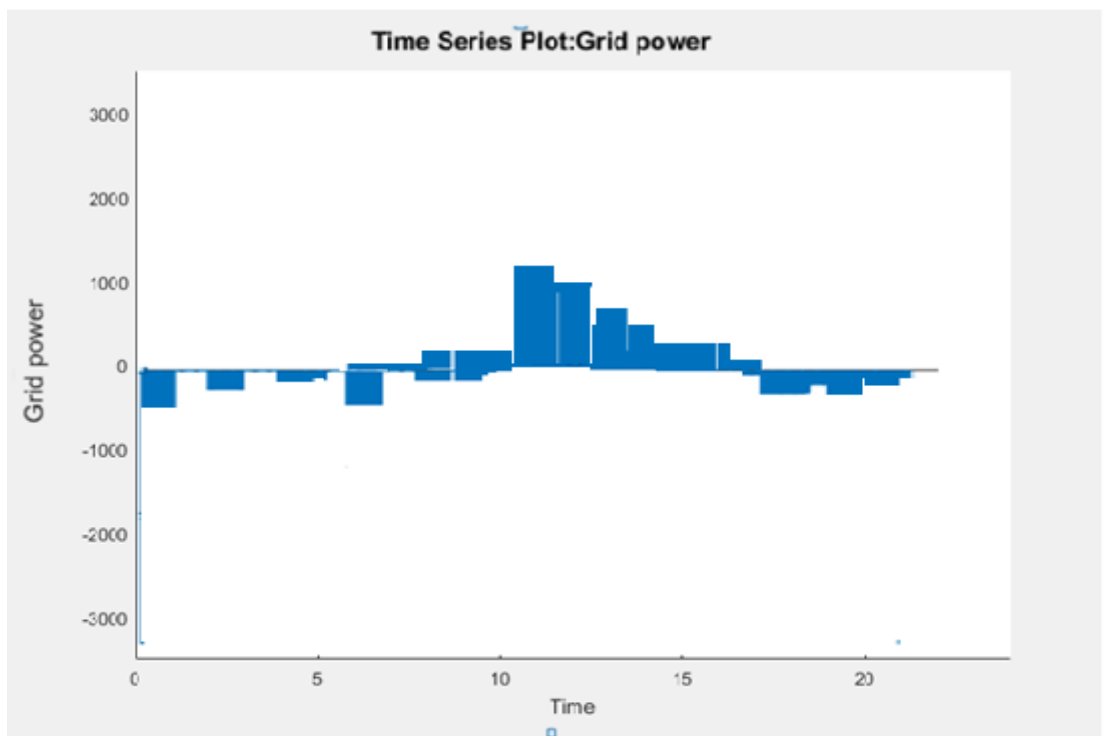


Figure III.25 : puissance de sortie du réseau électrique en printemps

On remarque bien que la puissance délivrée par le réseau se minimise et des fois s'annule à cause de la production des panneaux PV qui alimente les charges, l'excès de la production PV est injecté au réseau ce qui explique le côté positif de la courbe du réseau.

#### III.4. Etude comparative

- Le tableau III.2 résume tout le fonctionnement du système. Il présente la puissance produite, la puissance prise du réseau et la puissance injectée au réseau ainsi que la puissance consommée.

saïson	Puissance produite (KWh)	Puissance consommée (KWh)	Puissance du réseau (KWh)	% de la puissance réseau /produite
été	23.56	29.74	-6.18	-26.23 %
Printemps	25.33	14.35	10.98	43.34 %

**Tableau III.2 :** limite de satisfaction de la demande énergétique pour deux jours d'une saison différente (été, printemps)

D'après le tableau III.2, il est clair que la consommation énergétique en été est plus grande qu'en printemps à cause de l'utilisation du climatiseur.

Si on compare la puissance du réseau dans ces deux cas, on remarque que la puissance du réseau en été est de valeur négative qui signifie la prise de l'énergie du réseau, contrairement en printemps on voit que la puissance du réseau est positive et cela implique que nous sommes en train d'injecter dans le réseau.

Système PV	Avec gestion d'énergie	Sans gestion d'énergie
Nbr de module PV utilisé	12 modules	28 modules
Consommation énergétique	défini	indéfini
Frais et facture	Moins couteuse	Couteuse

**Tableau III.3 :** comparaison entre système PV avec et sans gestion d'énergie.

Le tableau III.3 montre que la gestion d'énergie joue un rôle très important pour diminuer le nombre des modules PV utilisés, minimiser les frais de l'installation et pour définir les consommations énergétiques de l'habitat solaire.

### **III.5. Conclusion**

La première partie de ce chapitre a été consacré à la présentation de la méthode de gestion utilisé dans le système PV raccordé au réseau sur le quelle on a travaillé. Ceci afin de présenté ces caractéristiques et ces paramètres d'entrés qui sont des données réelles. Les résultats obtenus lors de la simulation ont montré le bon fonctionnement du générateur PV qui est responsable de la puissance produite.

Pour optimiser le fonctionnement du système PV, la gestion des charges, qui est impérative, a été abordée à travers les résultats obtenus dans la deuxième partie de ce chapitre. L'efficacité de ce concept a été vérifiée par la simulation du comportement du système en utilisant les modèles présentés au chapitre 2 avec des données d'entrées réelles mesurées à l'UDES pour avoir des résultats réelles qui mène à optimiser le profil de consommation et avoir une bonne gestion des charges.

Mener à bien cette simulation, nous avons appliqué cette approche pour une optimisation du dimensionnement fondé sur les critères du cout énergétique sur cycle de vie et sur la qualité de service associé à la consommation. Les résultats ont montré que la stratégie de gestion élaborée (gestion des charges) permet de diminuer le nombre des modules PV utilisées et minimiser le cout du système PV ainsi que bénéficié de la grande puissance injectée au réseau durant l'année et qui réalise des gains important comme investissement.

## Conclusion générale

La première partie de ce travail porte sur des généralités sur les systèmes photovoltaïque, ou nous avons présenté tous les paramètres qui construisent un système PV comme le générateur PV, le convertisseur DC/DC, l'onduleur et le système de stockage. Nous avons parlé aussi sur la gestion d'énergie et les différents travaux qui ont été faites sur ce sujet.

Dans la seconde partie, des modèles comportementaux utilisés pour la simulation du fonctionnement d'un système PV doté d'un système de gestion d'énergie ont été présentés, ainsi qu'un dimensionnement d'une installation PV est fait et bien étudié pour assurer les aspects économiques et sa fiabilité.

Afin d'aller plus loin dans l'optimisation du dimensionnement des systèmes PV, une nouvelle stratégie de gestion optimale a été conduite dans ce travail, qui se focalise la gestion des charges d'une maison électrifiée par un système photovoltaïque connecté au réseau. Cette gestion de charge est basée sur déplacement (décalage) de fonctionnement des appareils électroménagers en fonction de la production photovoltaïque.

La simulation a été réalisée avec des données réelles mesurées pour le site de Bou-Ismaïl. Tous les résultats obtenus sont présentés dans la troisième partie ainsi qu'une petite étude comparative entre les résultats de cette gestion en été et au printemps.

Finalement, nous pouvons dire que l'approche de gestion d'énergie élaborée a contribué significativement à la réduction d'utilisation de panneaux PV. Cette stratégie de gestion d'énergie offre un double avantage ; le premier porte sur la réduction du cout et accroissement de la fiabilité du système PV et la minimisation de la facture d'électricité, dont le deuxième avantage réside dans l'injection de l'excès de l'énergie PV produite au réseau publique.

# Listes des figures

## Chapitre I

### Gestion d'énergie dans les systèmes PV

<b>Figure I.1</b> : La consommation d'énergie finale dans le monde en 2012 avoisine 9 milliards de tonnes d'équivalent pétrole (d'après Key World Energy Statistics 2014, AIE)	4
<b>Figure I.2</b> : L'évolution de la consommation dans le monde	5
<b>Figure I.3</b> : Consommation énergétique globale annuelle en Algérie	5
<b>Figure I.4</b> : évolution de la consommation de l'énergie électrique en Algérie	6
<b>Figure I.5</b> : évolution de la production électrique en Algérie	6
<b>Figure I.6</b> : Irradiations globales journalière reçues en Algérie sur un plan horizontal pour les mois de juillet (a) et décembre (b)	9
<b>Figure 1.7</b> : Programme algérien des EnR	10
<b>Figure I.8</b> : Analyse spectrale du rayonnement solaire.	12
<b>Figure I.9</b> : Rayonnement solaire et leurs appareils de mesures	12
<b>Figure I.10</b> : Description d'une photopile ou cellule photovoltaïque.	14
<b>Figure 1.11</b> : Système PV autonome	14
<b>Figure 1.12</b> : Système PV hybride	15
<b>Figure 1.13</b> : Système PV raccordé au réseau	15
<b>Figure I.14</b> : Cellule au Silicium Monocristallin.	17
<b>Figure I.15</b> : Cellule au Silicium Poly cristallin	18
<b>Figure I.16</b> : Cellule au Silicium amorphe (couche mince).	18
<b>Figure I.17</b> : Inclinaison et orientation d'un panneau solaire	19
<b>Figure I.18</b> : Caractéristiques I-V et P-V d'une cellule photovoltaïque dans des conditions standards (un éclairement de 1000W/m <sup>2</sup> et une température de 25	20
<b>Figure 1.19</b> . Les caractéristiques P-V d'un module PV (BP-MSX-120), (a) : en fonction de différents éclairagements à T=25°C, (b) : en fonction de différentes températures à S=1000W/m <sup>2</sup>	22
<b>Figure I.20</b> : Hacheur Boost (modèle du Matlab-Simulink)	23
<b>Figure I.21</b> : onduleur (modèle de Matlab / Simulink)	23



<b>Figure I.22</b> : Caractéristique I-V ou la MPPT fonctionne pour des différents ensoleillements	26
<b>Figure I.23</b> : Régulateur de charge	26
<b>Figure I.24</b> : Schéma des systèmes domestiques de gestion de l'énergie pour les maisons intelligentes	28
<b>Figure I.25</b> : profil de consommation et de production et classement de priorité des charges	29
<b>Figure I.26</b> : exemple de décalage de l'utilisation de la machine à laver	29
<b>Figure I.27</b> : Organigramme de gestion d'énergie	30

## **Chapitre II**

### **Modélisation et dimensionnement du système**

<b>Figure II.1</b> : carte de la ville de Bou-Ismaïl	32
<b>Figure II.2</b> : Maison inélégante situé à l'UDES (Bou-Ismaïl)	32
<b>Figure II.3</b> : Consommation journalière de la maison solaire en été	34
<b>Figure II.4</b> : Profil de charge journalier de la maison solaire en été	34
<b>Figure II.5</b> : Profil de charge hebdomadaire de la maison solaire en été	35
<b>Figure II.6</b> : Consommation journalière de la maison solaire en printemps	35
<b>Figure II.7</b> : Profil de charge journalier de la maison solaire en printemps	36
<b>Figure II.8</b> : Profil de charge hebdomadaire de la maison solaire en printemps	36
<b>Figure II.9</b> : Consommation journalière de la maison solaire en hiver	37
<b>Figure II.10</b> : Profil de charge journalier de la maison solaire en hiver	37
<b>Figure II.11</b> : Profil de charge hebdomadaire de la maison solaire en hiver	38
<b>Figure II.12</b> : Système PV	38
<b>Figure II.13</b> : schéma électrique équivalent du module PV sous Matlab-Simulink	39
<b>Figure II.14</b> : schéma électrique équivalent d'un convertisseur DC/DC sous Matlab/Simulink	40
<b>Figure II.15</b> : modèle de la batterie utilisée sous Matlab/Simulink	43
<b>Figure II.16</b> : exemple de rendement énergétique d'un onduleur de 500W	43
<b>Figure II.17</b> : Système de tensions triphasé équilibré	44
<b>Figure II.18</b> : Schéma de simulation de réseau sous Matlab-Simulink	45
<b>Figure II.19</b> : Modèle de réfrigérateur sous Matlab-Simulink	46

## **Chapitre III**

### **Résultats de simulation et discussions**

<b>Figure III.1</b> : System PV étudié (système PV On-Grid)	59
<b>Figure III.2</b> : Le bloc Simulink du système PV avec gestion d'énergie	60
<b>Figure III.3</b> : Caractéristiques I-V et P-V	61
<b>Figure III.4</b> : Profil d'irradiation et de température au site de l'UDES (Bou-Ismaïl) le 07-07-2016	63
<b>Figure III.5</b> : Profil d'irradiation et de température au site de l'UDES (Bou-Ismaïl)le 28-03-2016	63
<b>Figure III.6</b> : puissance produite par le panneau PV en été	64
<b>Figure III.7</b> : puissance produite par le panneau PV en printemps	64
<b>Figure III.8</b> : consommation énergétique journalière de la maison solaire en été	65
<b>Figure III.9</b> : consommation énergétique journalière de la maison solaire en printemps	65
<b>Figure III.10</b> : répartition de fonctionnement et de l'arrêt des appareils de la maison en fonction du temps (h)	66
<b>Figure III.11</b> : Description des charges utilisées sous Matlab-Simulink	66
<b>Figure III.12</b> : puissance consommée du démo-télévision	67
<b>Figure III.13</b> : puissance consommée du climatiseur	67
<b>Figure III.14</b> : puissance consommée du modem	68
<b>Figure III.15</b> : puissance consommée du laptop	68
<b>Figure III.16</b> : puissance consommée du fer à repassé	69
<b>Figure III.17</b> : puissance consommée de la machine à laver	69
<b>Figure III.18</b> : puissance consommée du micro-onde	70
<b>Figure III.19</b> : puissance consommée du réfrigérateur	70
<b>Figure III.20</b> : puissance consommée des lampes	71
<b>Figure III.21</b> : puissance consommée de la hotte	71
<b>Figure III.22</b> : profil total de consommation journalière de la maison solaire en été	72
<b>Figure III.23</b> : profil total de consommation journalière de la maison solaire en printemps	72
<b>Figure III.24</b> : puissance de sortie du réseau électrique en été	73
<b>Figure III.25</b> : puissance de sortie du réseau électrique en printemps	73



## Notations

<b>ER</b>	Energies renouvelables
<b>GPV</b>	Générateur photovoltaïque
<b>MPPT</b>	Maximum power point tracking
<b>PV</b>	Photovoltaïque
<b>P&amp;O</b>	Perturb and observe
<b>PWM</b>	Pulse width modulation
<b>STC</b>	Standard test conditions

## Symboles

<b>D</b>	Rapport cyclique
<b>E</b>	Erreur
<b>E<sub>g</sub></b>	Energie de gap (ev)
<b>FF</b>	Facteur de remplissage de la cellule
<b>I<sub>cc</sub></b>	Courant de court-circuit (A)
<b>I<sub>d</sub></b>	Courant de polarisation de la jonction PN de la diode (A)
<b>I<sub>e</sub></b>	Courant d'entrée du convertisseur DC-DC (A)
<b>I<sub>mp</sub></b>	Courant au point de puissance maximale (A)
<b>I<sub>ph</sub></b>	Courant produit par la photopile (A)
<b>I<sub>pV</sub></b>	Courant photovoltaïque (A)
<b>I<sub>s</sub></b>	Courant de saturation de la diode (A)
<b>I<sub>s</sub></b>	Courant de sortie du convertisseur DC-DC (A)
<b>k</b>	Constante de Boltzmann ( $k = 1,38.10^{-23}$ J/K)
<b>n</b>	Facteur d'idéalité de la diode
<b>P</b>	Puissance (W)
<b>P<sub>c</sub></b>	Puissance crête (W <sub>c</sub> )
<b>P<sub>in</sub></b>	La puissance du flux lumineux incident (W)
<b>P<sub>m</sub></b>	Puissance maximale fournie par le générateur (W)
<b>P<sub>pV</sub></b>	Puissance photovoltaïque (W)
<b>P<sub>s</sub></b>	Puissance de sortie du convertisseur DC/DC (W)
<b>q</b>	Charge de l'électron ( $q = 1,602.10^{-19}$ C)
<b>R<sub>S</sub></b>	Résistance série ( $\Omega$ )
<b>R<sub>sh</sub></b>	Résistance shunt ( $\Omega$ )

<b>S</b>	Eclairement ( $(W/m^2)$ )
<b>T</b>	Température ( $^{\circ}C$ )
<b>t<sub>r</sub></b>	Temps de réponse (s)
<b>t<sub>s</sub></b>	Temps de simulation (s)
<b>V<sub>ch</sub></b>	Tension de charge (V)
<b>V<sub>e</sub></b>	Tension d'entrée du convertisseur DC-DC (V)
<b>V<sub>mp</sub></b>	Tension au point de puissance maximale (V)
<b>V<sub>oc</sub></b>	Tension de circuit ouvert (V)
<b>V<sub>pv</sub></b>	Tension du module PV (V)
<b>V<sub>s</sub></b>	Tension de sortie du convertisseur DC-DC (V)

***Greco***

<b>η</b>	Rendement
<b>ΔE</b>	Changement de l'erreur

