

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou

FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE
ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT



Mémoire de MASTER EN ELECTRONIQUE

OPTION : Microélectronique

Présenté par :

MAHMOUDI Sabrina

RABEHI Saliha

Thème :

*Etude de conception d'un système
photovoltaïque autonome*

Dr NEMMAR Farida

Maitre de conférence « B » (UMMTO)

Présidente

Dr SAHEB KOUSSA Djohra

Maitre de recherche « B » (CDER)

Promotrice

Dr SIDI SAID Amel

Maitre assistante « A » (UMMTO)

Promotrice

Dr OURAHMOUN Ourida

Maitre assistante « A » (UMMTO)

Examinatrice

2017-2018

Remerciements

On tient tout d'abord à remercier notre promotrice M^{me} KOUSSA Djohra, attaché de recherche au CDER, qui a proposé et dirigé ce travail, on lui est extrêmement reconnaissantes pour ses précieux conseils, orientations, patience qui ont constitué un apport considérable sans lesquels ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port.

Nos vifs remerciements s'adressent aussi à notre Co-promotrice M^{me} SIDI SAID Amel, enseignante à l'université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. On lui est extrêmement reconnaissantes pour sa confiance, sa disponibilité, et aussi pour son aide et ses conseils.

On remercie aussi les membres de jury qui ont fait l'honneur de bien vouloir examiner ce travail.

Nos remerciements vont également à tous nos amis.

À toute la promotion micro-électronique 2017/2018.

Dédicace

A nos parents,

A toutes nos familles,

Et tous ceux qui nous sont Chers

SABRINA et SALIHA

Nomenclature

Ah : ampèreheure.

CA : courant alternatif.

CC : courant continu.

FF : facteur de forme.

GPV : générateur photovoltaïque.

I_{cc} : courant du court circuit.

I_{ccNp} : la somme des courants de court-circuit des cellules en parallèle.

I_{ccNs} : la somme des courants de court-circuit des cellules en série.

I_{max} : courant maximal.

I_p : photocourant.

I_{ph} : le courant photonique.

I_{pv} : courant du générateur photovoltaïque.

I_s : le courant de saturation.

K : la constante de Boltzmann (1,381.10⁻²³ Joules/Kelvin).

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion.

N_p : nombre de cellule en parallèle.

N_s : nombre de cellule en série.

P_{in} : puissance incidente.

P_{max} : puissance maximale.

PPM : Point de Puissance Maximal.

MPT : Maximal Power Tracking.

PV : photovoltaïque.

Q : charge de l'électron (1,602 × 10⁻¹⁹).

R_s : résistance série.

R_{sh} : résistance shunt.

T : température absolue en Kelvin.

T_c : la température absolue.

U : la tension.

V_{co} : la tension en circuit ouvert.

V_{coNp} : la tension du circuit ouvert des cellules en parallèle.

V_{coNs} : la tension du circuit ouvert des cellules en série.

V_{max} : tension maximale.

V_{pv} : tension du générateur photovoltaïque.

η : le rendement.

Liste des figures

Figure I.1: Les éléments d'un système PV autonome	3
Figure I.2 : Caractéristique courant-tension d'une cellule PV	4
Figure I.3 : Effet de l'éclairement sur la cellule.....	6
Figure I.4 : Effet de la température sur la cellule.....	7
Figure I.5 : La constitution d'un module PV.....	8
Figure I.6 : Encapsulation des cellules.....	8
Figure I.7 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de (Ns) cellules en séries.....	9
Figure I.8 : Caractéristiques d'un groupement de (Np) cellules en parallèle.....	10
Figure I.9 : (a) Architecture classique d'un panneau solaire photovoltaïque avec diodes de protections. (b) Défaillance d'une des cellules du module PV et activation de diode de circulation I_{pv}	11
Figure I.10 : caractéristique (I_{pv} - V_p) d'un panneau photovoltaïque (BP585) et effet d'une des (36) cellules qui composent le module PV	12
Figure I.11 : Caractéristique $I(V)$ d'un module photovoltaïque.....	13
Figure I.12 : Extrait fiche technique.....	15
Figure I.13 : Composition de la batterie.....	16
Figure I.14 : Structure d'une batterie acide-plomb classique.....	18
Figure I.15 : Composition de la batterie acide-plomb.....	19
Figure I.16 : Principe électrochimique de la décharge d'une batterie acide-plomb.....	19
Figure I.17 : Production de sulfate de plomb $PbSO_4$ lors de la décharge d'une batterie.....	20
Figure I.18 : Phénomène de la sulfatation.....	20
Figure I.19 : Phénomènes d'autodécharge.....	21
Figure I.20 : Principe électrochimique de la charge.....	22
Figure I.21 : Processus de surcharge.....	23
Figure I.22 : Evolution du courant de charge en fonction de l'état de charge.....	24
Figure I.23 : Courbe de rendement d'un régulateur MLI avec fonction MPPT.....	27
Figure II.1 : Composantes du rayonnement solaire sur un plan horizontal.....	31
Figure II.2 : Composantes du rayonnement solaire sur un plan incliné.....	32
Figure II.3 : Schéma équivalent d'une cellule PV avec une seule diode.....	34
Figure II.4 : Caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule photovoltaïque à une seule diode....	34
Figure II.5 : Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles.....	35
Figure II.6 : Caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule photovoltaïque avec deux diodes....	35

Figure II.7 : Définition de la masse d'air.....	38
Figure II.8 : Les inclinaisons possibles des panneaux PV.....	38
Figure II.9 : Rendement global & Différentes pertes au sein d'une installation photovoltaïque autonome.....	40
Figure II.10 : d'une cellule et d'un module exposés au rayonnement solaire.....	41
Figure II.11 : Modélisation électrique d'un câble.....	42
Figure II.12 : Gain de puissance avec ou sans régulateur MPPT.....	43
Figure II.13 : a- L'énergie journalière consommée E_{Besoin}	45
b- L'irradiation solaire journalière E_i	45
c- Puissance crête nécessaire au bon fonctionnement de l'installation.....	45
Figure III.1 : Présentation de PVsyst.....	49
Figure III.2 : Désignation du projet dans PVsyst.....	50
Figure III.3 : Coordonnées géographiques du site de Tizi-ouzou.....	51
Figure III.4 : Données Météorologiques mensuelles de Tizi-ouzou.....	51
Figure III.5 : Diagramme de la trajectoire du soleil.....	52
Figure III.6 : Orientation des panneaux.....	52
Figure III.7 : Calcul des besoins électriques	53
Figure III.8 : Dimensionnement du champ PV.....	54
Figure III.9 : Les caractéristiques du panneau.....	54
Figure III.10 : Caractéristiques du régulateur MPPT.....	55
Figure III.11 : Dimensionnement du parc de batteries.....	56
Figure III.12 : Les caractéristiques de la batterie.....	56
Figure III.13 : Etude économique.....	57
Figure IV.1 : Variation de la température et du rayonnement solaire mensuelle sur le site de TiziOuzou.....	59
Figure IV.2: Rapport sur les paramètres de la simulation	60
Figure IV.3: Rapport sur les besoins énergétiques de l'utilisateur	61
Figure IV.4: Rapport des résultats principaux	63
Figure IV.5: Diagramme des pertes	65
Figure IV.6: Effet des différentes pertes sur la caractéristique I(V).....	66
Figure IV.7: L'évaluation économique de l'installation	67
Figure IV.8: Emission du CO2 du système	68
Figure IV.9: Bilan du CO2 émis	69

Liste des tableaux

Tableau II.1 : exemples d'ampoules électriques et leurs puissances	38
Tableau II.2 : exemples d'appareils à faible puissance.....	38
Tableau II.3 : exemples d'appareils à forte puissance.....	38
Tableau II.4 : exemple de calcul des besoins électriques d'une maison.....	39
Tableau II.5 : rendement d'une cellule PV selon sa technologie	42
Tableau II.6: Rendement moyen d'un régulateur photovoltaïque	44
Tableau III. 1: caractéristique technique de l'onduleur.....	59

Sommaire

Remerciements

Dédicaces

Nomenclature

Listes des figures

Introduction générale	01
Chapitre I : Présentation du système PV autonome	
I.1 Introduction.....	03
I.2 Principe d'un système PV autonome.....	03
I.3 Les cellules et modules PV.....	04
I.3.1 La cellule photovoltaïque	04
a- Définition d'une cellule solaire.....	04
b- Caractéristique courant-tension d'une cellule PV.....	04
c- Effet du niveau d'éclairement sur la cellule PV.....	06
d- Effet de la température sur la cellule PV.....	07
I.3.2 Le module photovoltaïque.....	08
a- La constitution d'un module photovoltaïque.....	09
b- Des cellules au module PV.....	09
c- Caractéristique courant-tension d'un module PV.....	13
d- Savoir lire une fiche technique.....	14
I.4 Les batteries.....	15
I.4.1 Définition.....	15
I.4.2 Composition des batteries.....	15
I.4.3 Principales caractéristiques des batteries	16
I.4.4 Différentes technologies de batteries.....	17
a-La batterie Nickel-Cadmium (Ni-Cd).....	17
b-La batterie Nickel-Métal-Hydrure (Ni-MH).....	17
c-La batterie lithium-ion (Li-Ion).....	18
d-La batterie à l'Acide-Plomb.....	18
I.4.5 Processus de décharge de la batterie Acide-Plomb.....	19
I.4.6 La charge de la batterie Acide-Plomb	21
I.4.7 Propriétés électrochimique de la batterie Acide-Plomb.....	23
I.4.8 Entretien et maintenance de la batterie Acide-Plomb.....	24

I.5 Le régulateur.....	24
I.5.1 Définition d'un régulateur.....	24
I.5.2 Rôles de la régulation.....	25
I.5.3 Historique des régulateurs.....	26
I.5.4 Rendements des régulateurs.....	27
I.6 L'onduleur	28
I.6.1 Rôle de l'onduleur	28
I.6.2 Dimensionnement de l'onduleur	28
I.6.3 Performance de l'onduleur	29
I.7 La charge	30
I.8 Conclusion	30
 Chapitre II : Modélisation et dimensionnement d'une installation PV	
II.1 Introduction	31
II.2 Modélisation du gisement solaire	31
II.2.1 Reconstitution du rayonnement sur un plan horizontal	31
• Rayonnement direct	31
• Rayonnement diffus	32
• Rayonnement global	32
II.2.2 Reconstitution du rayonnement solaire sur un plan incliné	32
• Rayonnement direct	33
• Rayonnement diffus.....	33
• Rayonnement réfléchis	33
• Rayonnement global	33
II.3 Modélisation du système photovoltaïque.....	33
II.3.1 Modèle à une diode	33
II.3.2 Modèle à deux diodes	34
II.4 Définition des besoins électriques	35
II.4.1 Inventaire des appareils.....	36
• Eclairage	36
• Equipement courant à faibles puissance électrique.....	36
• Equipement courant à forte puissance électrique	36
II.4.2 Calculs des besoins électriques.....	36
II.5 Evaluation du gisement solaire locale.....	37

- L'éclairage solaire.....	37
- L'irradiation solaire.....	37
II.5.1 Influence de la localisation sur le gisement solaire.....	37
• La longitude.....	37
• La latitude.....	37
• L'altitude.....	38
• La nébulosité	38
• L'air masse	38
II.5.3 Angle d'inclinaison optimale du module PV	39
II.5.4 Orientation du module PV	39
II.6 Qualité d'une installation photovoltaïque autonome	39
II.6.1 Rendement des modules	40
II.6.2 Pertes par échauffement des câbles	42
II.6.3 Rendement du régulateur	42
II.6.4 Pertes par absence du MPPT	43
II.6.6 Rendement des batteries	43
II.6.7 Rendement de l'onduleur	43
II.6.8 Autres pertes	44
II.6.9 Le ratio de performance PV.....	44
II.7 Dimensionnement du champ PV	44
II.7.1 Formule de calcul de la puissance crête photovoltaïque	44
II.7.2 Application de la formule de calcul de la puissance crête	45
II.8 Dimensionnement du parc de batteries	45
II.8.1 Choix de la tension du parc de batteries.....	45
II.8.2 Choix de la capacité du parc de batteries.....	46
II.9 Choix du régulateur.....	46
II.10 Choix de l'onduleur.....	47
II.11 Dimensionnement des câbles.....	47
II.11.1 Courant admissible des câbles	48
II.11.2 Chute de tension	48
II.11.3 Conditions de fonctionnement des câbles photovoltaïques	48
II.12 Conclusion.....	48

Chapitre III : Etude de cas maison individuelle alimentée par une installation PV

autonome

III.1 Introduction.....	49
III.2 Site d'implantation.....	49
III.2.1 Situation géographique de Tizi Ouzou.....	49
III.2.2 Climat de Tizi Ouzou	49
III.3 Présentation du logiciel PVsyst.....	49
III.4 les étapes de la simulation d'un système PV autonome sous PVsyst.	50
III.4.1 Désignation du projet	50
III.4.2 Les paramètres du site	50
III.4.3 Orientation des panneaux	52
III.4.4 Détermination des besoins électriques	53
III.4.5 Dimensionnement du champ PV	53
III.4.6 Le choix du régulateur	54
III.4.7 Dimensionnement du parc de batteries	55
III.4.8. Le choix de l'onduleur	57
III.5 Etude Economique	57
III.6 Configuration du système photovoltaïque étudié.....	58
III.7 Conclusion	58

Chapitre IV : Interprétation des résultats

IV.1 Introduction.....	59
IV.2 Le rapport de la simulation.....	59
IV.3 Conclusion.....	69
Conclusion générale.....	70

Annexe

Bibliographie

Introduction générale

Durant ces dernières années, le développement des sociétés industrielles, des moyens de transport et de la communication a vu un énorme progrès, ce qui conduit à un besoin d'énergie électrique important.

La grande partie de l'énergie électrique utilisée et produite à partir de source fossile. Cette dernière étant une source épuisable, a provoqué l'utilisation des autres sources d'énergie de types renouvelables.

Aujourd'hui, les énergies renouvelables deviennent progressivement des énergies à part entières dans plusieurs pays du monde avec des systèmes de conversion convenable à chaque type dont on distingue :

- Energie photovoltaïque qui est la transformation des rayonnements solaire en énergie électrique.
- Energie thermique provenant aussi de l'énergie solaire.
- Energie éolienne qui produit de l'électricité à partir du vent.
- Energie biomasse qui produit de l'énergie à partir de la matière organique, qu'elle soit d'origine végétale ou animale.

L'électricité provenant des sources renouvelables est intermittente, et dépend des conditions climatiques ; pour cela un système de stockage de l'énergie produite est nécessaire pour assurer la disponibilité d'énergie en continue.

Le type de source de production d'énergie étudié dans ce travail est le photovoltaïque, plus exactement la conception d'une installation photovoltaïque autonome assurant la production d'énergie électrique durant une année entière pour une demeure isolée.

Cependant, le système sélectionné est composé d'un champ photovoltaïque (PV) avec un système de stockage qui est un ensemble de batteries, généralement des batteries au plomb, ainsi qu'un régulateur de charge et de décharge, qui est un élément important dans le système PV, et un onduleur pour convertir le courant continu produit par le panneau PV en un courant alternatif alimentant la charge électrique qui est l'ensemble des appareils électriques contenus dans la demeure isolée située à Tizi-Ouzou, en utilisant des composants fiables et économiques.

A ce propos nous avons organisé notre mémoire en quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré a la présentation des différents composants du système, commençant par le capteur des rayonnements solaires qui est un panneau

photovoltaïque, puis des différents types de stockage de l'énergie produite par le panneau ainsi qu'un régulateur et l'onduleur pour arriver à la charge.

Le deuxième chapitre est l'étude détaillée des composants du système PV et leurs rendements.

Le troisième chapitre, concerne le dimensionnement, l'étude économique et environnementale de l'installation photovoltaïque moyennant le logiciel conçu pour ce type d'installation : PVsyst.

Pour ce qui concerne le quatrième chapitre, il est relatif à la présentation et à la discussion des résultats obtenus.

En conclusion générale, nous présentons une synthèse des travaux effectués ainsi que les principaux résultats obtenus, puis les perspectives à entreprendre dans l'avenir.

I. 1 Introduction

La technologie photovoltaïque est utilisée dans plusieurs domaines de différentes manières. Ce mémoire est consacré à l'étude d'un système photovoltaïque autonome installé à fin d'assurer le besoin d'énergie électrique d'une maison située à Tizi-Ouzou.

La première partie est une étude générale du système PV et les différentes technologies de ses composants ainsi que leur fonctionnement et leur rôle.

I.2 Principe d'un système PV autonome

Un système PV autonome ou isolé est une installation photovoltaïque (PV) non reliée à un réseau de distribution. Le *système PV autonome* permet de fournir du courant électrique à des endroits où il n'y a pas de réseau. Il se révèle particulièrement adapté pour des applications où il n'est pas toujours possible de mettre en place un réseau d'alimentation classique, soit à cause de contraintes techniques, soit pour des raisons économiques.

D'une manière générale, un tel système peut se schématiser comme suit :

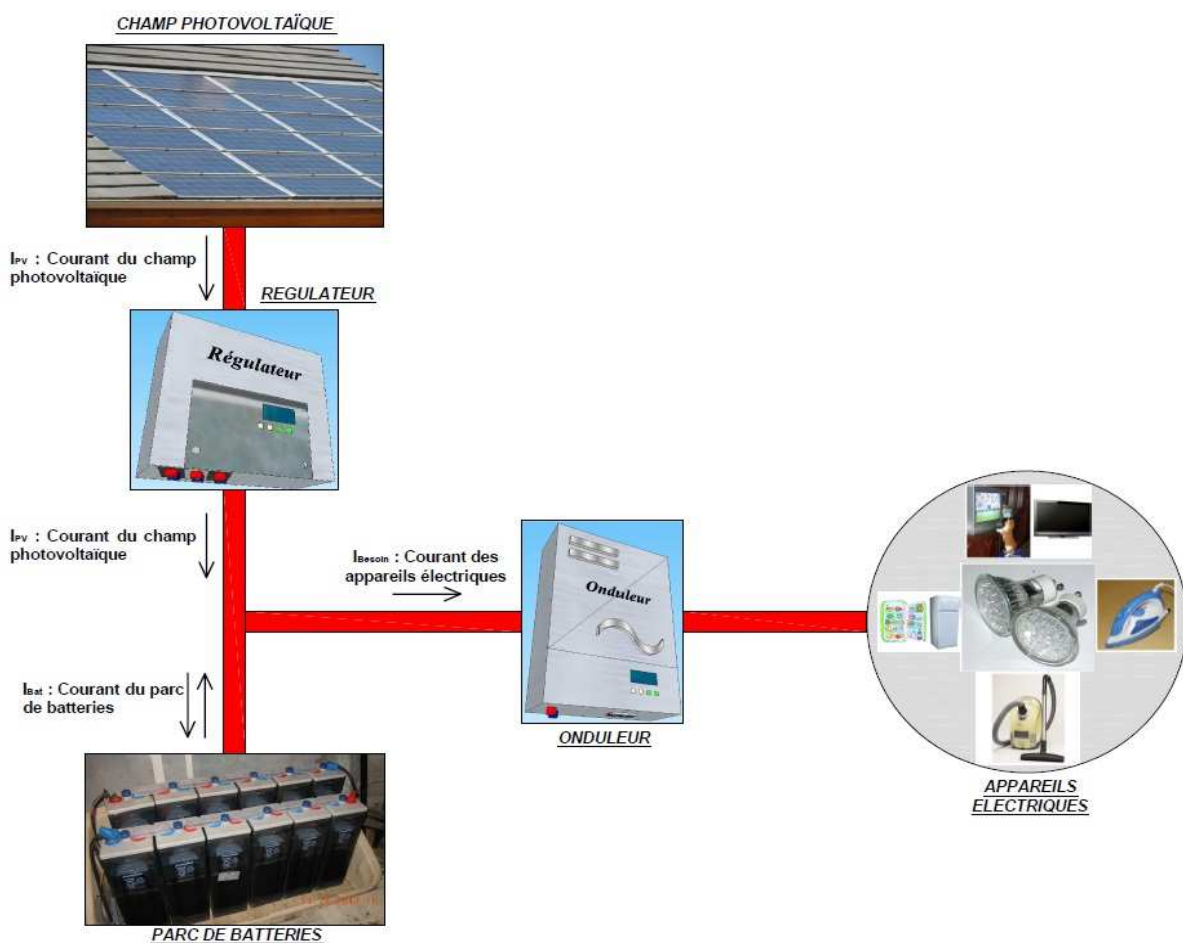


Figure I.1: Les éléments d'un système PV autonome

I.3 Les cellules et modules PV [1]

I.3.1 La cellule photovoltaïque

a- Définition d'une cellule solaire

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériau semi-conducteur et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques sont constituées :

- D'une fine couche semi-conductrice (matériau possède une bande interdite, qui joue le rôle de la barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.
- D'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- D'une grille conductrice au niveau de la cathode et d'un métal conducteur au niveau de l'anode.
- Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissantes justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.

b- Caractéristique courant-tension d'une cellule PV

Il existe de nombreux paramètres qui permettent de caractériser une cellule solaire. Ces paramètres sont appelés paramètres photovoltaïques et sont déduits de la caractéristique $I(V)$. La figure I.2 représente une caractéristique courant-tension $I(V)$ dans le noir et sous illumination typique d'une cellule photovoltaïque à jonction PN. Le tracé de cette courbe permet d'accéder à bon nombre de paramètres physiques caractéristiques du composant. Les premiers paramètres qui apparaissent sur la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque sont le courant de court circuit (I_{cc}), la tension à circuit ouvert (V_{co}) et le facteur de forme FF; prend une valeur entre (1 et 2) ainsi que le rendement η .

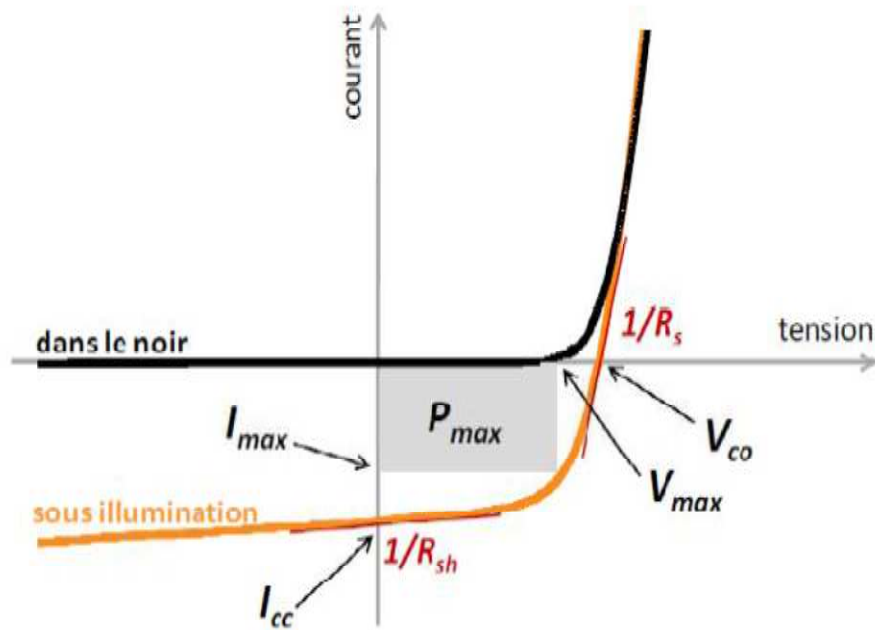


Figure I.2 : Caractéristique courant-tension d'une cellule PV

- **Courant de court circuit (I_{cc})** : Il s'agit du courant lorsque le potentiel appliqué à la cellule est nul. C'est le plus grand courant que la cellule peut fournir. Celui-ci est en fonction de la température, de la longueur d'onde du rayonnement, de la surface activée de la cellule, de la mobilité des porteurs. Ce courant est linéairement dépendant de l'intensité lumineuse reçue.
- **Tension à circuit ouvert (V_{co})** : Comme son nom l'indique, c'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance infinie. Elle dépend essentiellement du type de la cellule solaire (jonction PN, jonction Schottky), des matériaux de la couche active et de la nature des contacts de la couche active-électrode. Elle dépend de plus de l'éclairement de la cellule.

$$V_{co} = \frac{kT_c}{q} \log\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \quad (1)$$

Avec :

kT_c/q : représentant le potentiel thermodynamique.

K : la constante de Boltzmann ($1,381.10^{-23}$ Joules/Kelvin).

q : la charge d'un électron.

T_c : la température absolue.

I_s : le courant de saturation.

I_{ph} : le courant photonique

- **Facteur de forme FF** : C'est Un paramètre important souvent utilisé à partir de la caractéristique I(V) pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV : c'est le

facteur de remplissage ou « fill factor (FF) ». Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{max} et la puissance formée par le rectangle $I_{cc} \cdot V_{co}$. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales. Ainsi, le facteur de forme est défini par la relation suivante:

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (2)$$

La puissance des modules photovoltaïques s'exprime en Watts-Crète. Cette dernière représente la puissance que peut fournir un module lorsqu'il est dans les conditions standards, sous un éclairage de 1000 W/m^2 et à une température de 25°C .

- **Le rendement η** : Le rendement η des cellules photovoltaïques PV désigne le rendement en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{co}}{P_{in}} \quad (3)$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. Le rendement de conversion est un paramètre essentiel. En effet, la connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule.

c- Effet du niveau d'éclairage sur la cellule PV [2]

Au cours des paragraphes précédents, nous avons évoqué l'augmentation de l'intensité du photocourant pour une hausse du rayonnement solaire. La figure 1.3 représente la variation du courant par rapport à la tension pour deux différentes intensités lumineuses et les maximums de puissance pour chaque cas.

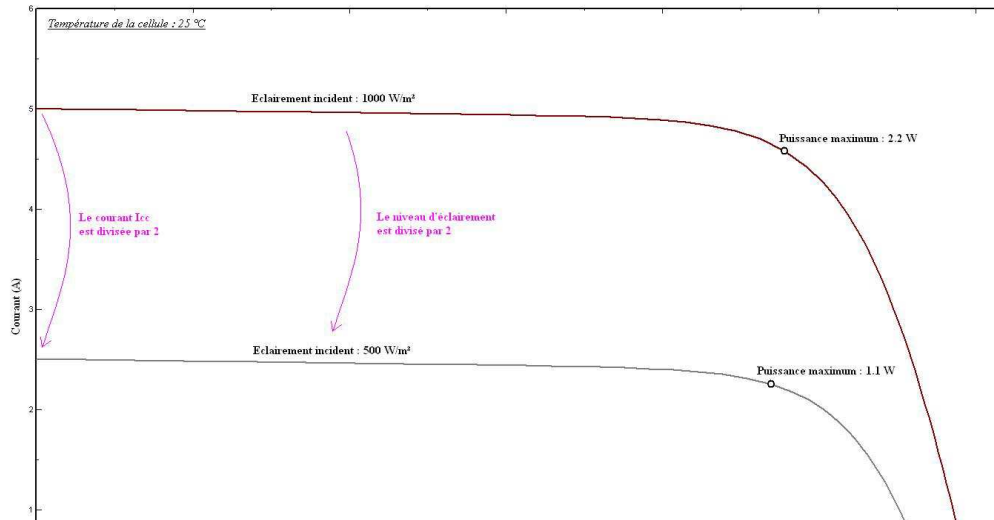


Figure I.3 : Effet de l'éclairement sur la cellule

Sur cette figure on remarque que le courant est directement proportionnel au rayonnement solaire. Par contre, la tension est relativement peu dégradée. On en déduit donc que la cellule peut fournir une tension acceptable, même à faible éclairage.

Il est important de noter que, lorsque l'éclairement est plus faible que 100 W/m², la tension de la photopile varie à son tour. Elle baisse avec l'éclairement (variation logarithmique). Seules les photopiles au silicium amorphe permettent un fonctionnement dans ces conditions, grâce à une tension encore assez élevée. C'est pour cette raison que le silicium amorphe peut être utilisé sous éclairage artificiel, contrairement au silicium cristallin. Ceci contribue dans le choix de cellules.

d- Effet de la température sur la cellule PV [2]

Pour connaître la courbe caractéristique d'une cellule solaire, on part de la caractéristique d'une diode au silicium (jonction P-N dans l'obscurité) et on prend ensuite en compte l'illumination. On obtient alors la relation suivante :

$$I = I_p - I_s (e^{U/U_t} - 1) \quad (4)$$

Avec

I_s = courant de saturation de la diode

I_p = photocourant

U = tension imposée à la diode

$U_t = kT/q = 26 \text{ mV}$ à 300 K

$k = 1,38 \times 10^{-23}$ constante de Boltzmann

$q = 1,602 \times 10^{-19}$ charge de l'électron

T = température absolue en Kelvin

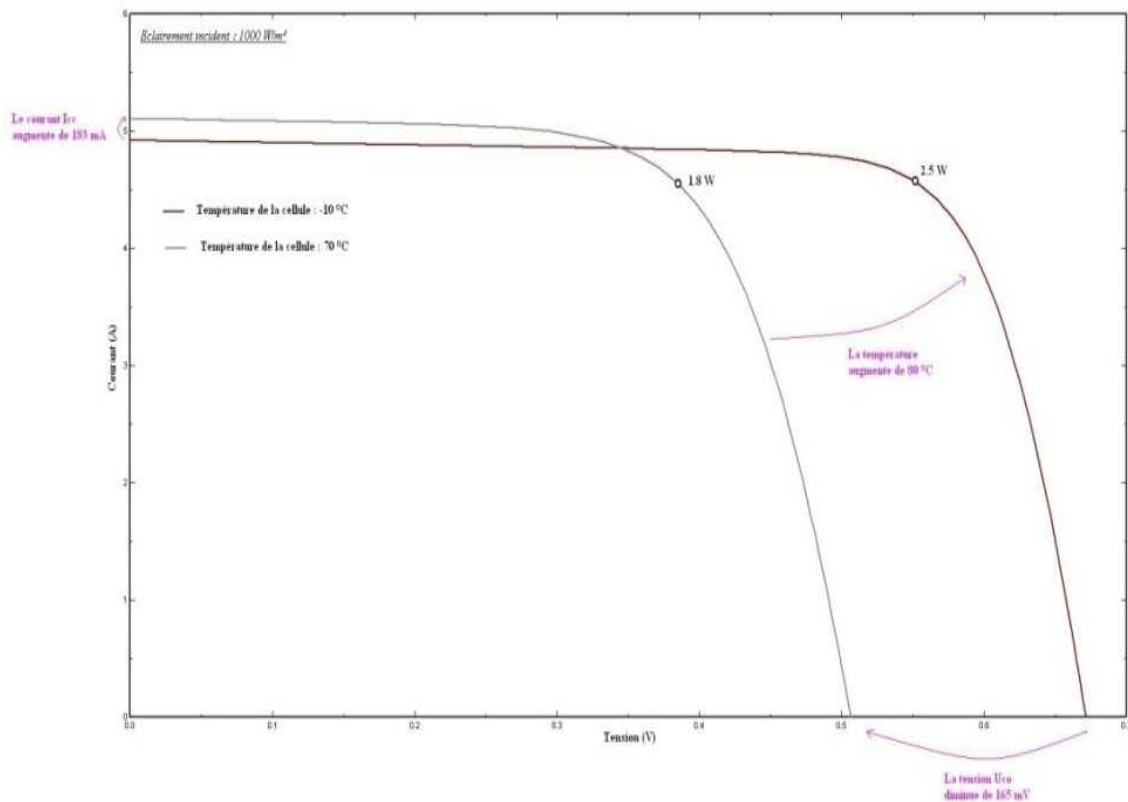


Figure I.4 : Effet de la température sur la cellule

On observe que la température de la cellule photovoltaïque induit un effet notable sur la tension de celle-ci. Par contre, l'effet de la température sur le courant de la cellule photovoltaïque est négligeable.

Il apparaît que plus la température de la cellule augmente, plus la tension à vide de celle-ci diminue. La puissance de la cellule étant égale au produit du courant et de la tension, la même règle s'applique sur la puissance : plus la température de la cellule augmente, plus la puissance de celle-ci diminue.

I.3.2 Le module photovoltaïque [1]

Un générateur photovoltaïque ou module est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïque élémentaires montées en série et /ou parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées tels que la puissance, le courant de court circuit et la tension en circuit ouvert.

a- La constitution d'un module photovoltaïque

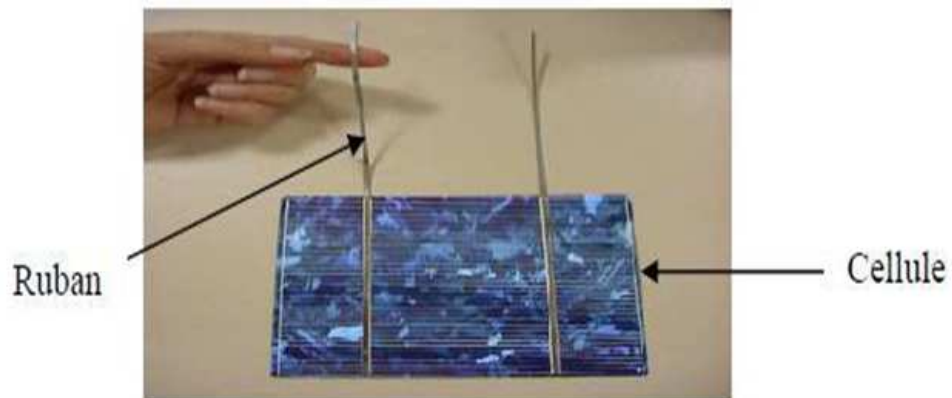


Figure I.5 : La constitution d'un module PV

Les cellules sont connectées entre elles par un fin ruban métallique (cuivre étamé), du contact en face avant (-) au contact en face arrière (+) figure I.5.

Les cellules sont encapsulées sous vide entre deux films thermoplastiques transparents (EVA: Éthylène Acétate de Vinyle). Le plus souvent, il y a présence d'un cadre en aluminium avec joint périphérique pour permettre la dilatation. Un verre trempé en face avant protège les cellules sur le plan mécanique tout en laissant passer la lumière. La face arrière est constituée d'un verre ou d'une feuille TEDLER.

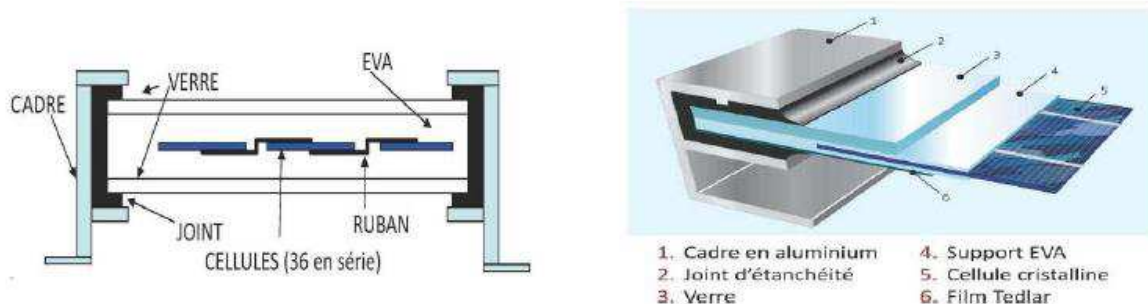


Figure I.6 : Encapsulation des cellules

b- Des cellules au module PV

Un module photovoltaïque est un ensemble de plusieurs cellules photovoltaïques identiques connectées entre elles en série, ou en parallèle.

- **Association des cellules en série :** Une association de (N_s) cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultante de groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, un tel regroupement est représenté par la figure I.7.

L'équation (5.a) résume les caractéristiques électriques d'une association série de (N_s) cellules.

$$V_{coNS} = N_s \cdot V_{co} \quad (5.a)$$

$$I_{cc} = I_{ccNS} \quad (5.b)$$

N_s : nombre de cellules en série

V_{coNs} : la somme des tensions en circuit ouvert de N_s cellules en série.

I_{ccNs} : courant de court-circuit de N_s cellules en série.

Ce système d'association est généralement le plus communément utilisé pour les modules photovoltaïques du commerce.

Comme la surface de cellules devient de plus en plus importante, le courant produit par une seule cellule augmente régulièrement au fur et à mesure de l'évolution technologique alors que sa tension reste toujours très faible.

L'association série permet ainsi d'augmenter la tension de l'ensemble et donc d'accroître la puissance de l'ensemble.

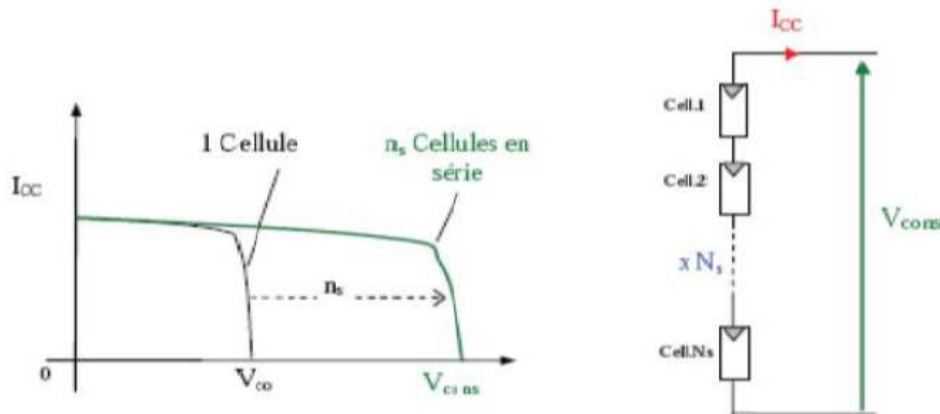


Figure I.7 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de (N_s) cellules en séries

- **Association des cellules en parallèle :** Une association parallèle de (N_p) cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créée. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants.

Les équations (6.a et 6.b) et la figure1.8 résument les caractéristiques électriques d'une association parallèle de (N_p) cellules.

$$I_{ccNP} = N_p \cdot I_{cc} \quad (6.a)$$

$$V_{co} = V_{coNP} \quad (6.b)$$

Avec :

N_p : nombre de cellules en parallèles

I_{ccNp} : la somme des courants de court-circuit de (N_p) cellules en parallèle.

V_{coNp} : la tension du circuit ouvert de (N_p) cellules en parallèle.

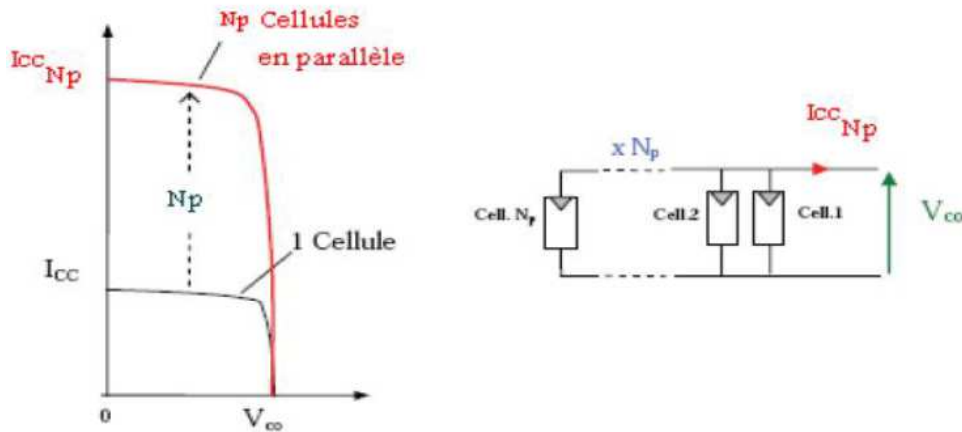


Figure I.8 : Caractéristiques d'un groupement de (N_p) cellules en parallèle.

- **Association des cellules série et parallèle :** La caractéristique ($I_{pv} - V_{pv}$) d'un générateur solaire peut être considérée comme le fruit d'une association d'un réseau de ($N_s * N_p$) cellules en série /parallèle. La caractéristique globale peut en outre, varier en fonction de l'éclairement, température, du vieillissement des cellules et les effets d'ombrage ou d'inhomogénéité de l'éclairement.

De plus, il suffit d'une occultation ou d'une dégradation d'une des cellules mises en série pour provoquer une forte diminution du courant produit par le module photovoltaïque.

Lorsque le courant débité est supérieur au courant produit par la cellule faiblement éclairée, la tension de celle-ci devient négative et devient un élément récepteur. Celle-ci se trouve à dissiper une quantité trop importante de puissance électrique qui pourrait aboutir à sa destruction si le défaut persiste trop longtemps. C'est le phénomène du point chaud. Pour remédier à ce phénomène, on équipe donc les panneaux photovoltaïques des diodes by-pass qui ont pour rôle de protéger les cellules qui deviennent passives figure I.9.a. Des mesures réalisées sur un module photovoltaïque commercial de (85Wc) sur lequel on occulte volontairement (à différents niveaux d'ombrage) une des (36) cellules qui composent se générateur sont consignées en figure I.9.

On observe bien la déformation de la courbe ($I_{pv} - V_{pv}$) (Figure I.10) liée à un effet d'ombrage partiel du module PV. La diode by-pass lorsqu'elle se met à fonctionner, court-circuite alors une partie du panneau comme indiqué en figure I.9.b, évitant ainsi la circulation du courant inverse au sein des cellules défectueuses. Par contre, cette solution efficace réduit

d'autant la puissance délivrée ainsi que la tension aux bornes du panneau. La dégradation d'une seule cellule condamne donc le groupe de cellules associées à la cellule défectueuse, elle est protégée par la diode (by-pass) à ne pas produire de puissance. Ce phénomène de perte parallèle de puissance est à comparer à la perte totale d'un panneau entier en cas de problème sur une cellule avec un panneau fonctionnant sans protection. Un tel regroupement des cellules (série et parallèle) avec diode de protection sont représentés par la figure qui suit.

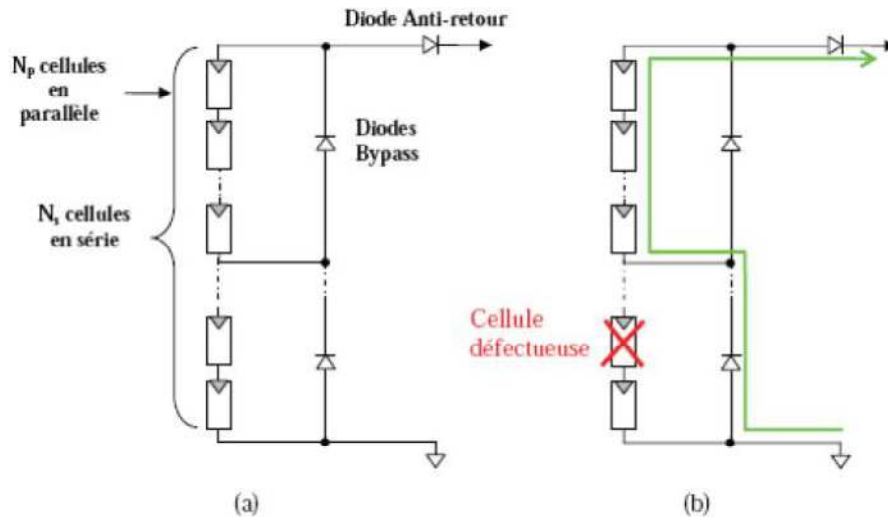


Figure I.9 : (a) Architecture classique d'un panneau solaire photovoltaïque avec diodes de protections. (b) Défaillance d'une des cellules du module PV et activation de diode de circulation I_{pv}

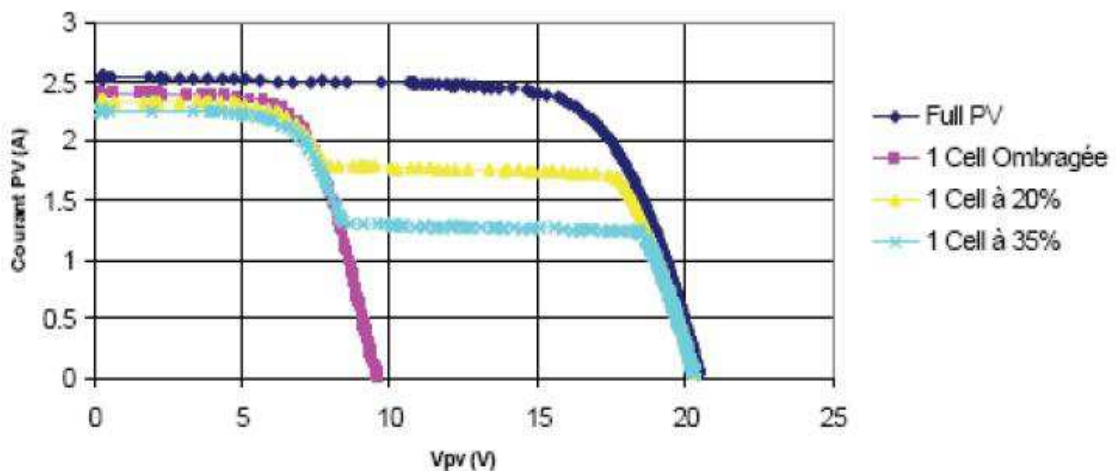


Figure I.10 : caractéristique (I_{pv} - V_p) d'un panneau photovoltaïque (BP585) et effet d'une des (36) cellules qui composent le module PV

On s'aperçoit donc que la maîtrise de cette énergie photovoltaïque n'est pas aussi simple qu'il n'y paraît. La production de courant dans un module photovoltaïque du commerce est donc limitée par la cellule la plus faible de l'ensemble. Généralement, lors de l'assemblage des cellules, il est nécessaire de les trier en fonction de leurs caractéristiques électriques afin d'obtenir une association homogène et ainsi éviter de limiter la puissance fournie par le panneau à cause d'une dispersion des cellules. De plus, le vieillissement des cellules peut produire une dispersion des caractéristiques. Les conditions météorologiques auxquelles les modules sont soumis (ensoleillement inhomogène, température, salissures, neige, pluie, dépôt de feuilles mortes..) fait de l'énergie photovoltaïque une ressource difficilement maîtrisable.

c- Caractéristique courant-tension d'un module PV

Les caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque varient en fonction de la température, de l'éclairement et, de façon générale, des conditions de fonctionnement lorsqu'il est connecté à une charge donnée. Nous rappelons brièvement dans ce paragraphe le comportement du générateur soumis à diverses contraintes. Ces notions sont en effet nécessaires pour comprendre le comportement d'un générateur PV et ensuite effectuer des optimisations de fonctionnement figure I.11.

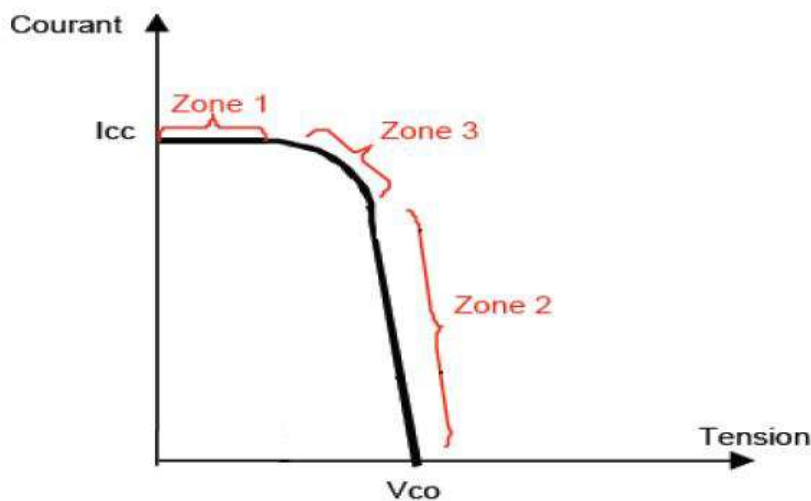


Figure I.11 : Caractéristique I(V) d'un module photovoltaïque

La caractéristique d'un générateur PV constitué de plusieurs cellules à une allure générale assimilable à celle élémentaire, sous réserve qu'il n'y ait pas de déséquilibre entre les caractéristiques de chaque cellule (irradiation et température uniforme).

Nous pouvons décomposer la caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque en trois zones:

- Une zone assimilable à un générateur de courant I_{cc} proportionnel à l'irradiation, d'admittance interne pouvant être modélisée par $1/R_{sh}$ (zone 1).

- Une zone assimilable à un générateur de tension V_{co} d'impédance interne équivalente à la résistance série R_s (zone 2).
- Une zone où l'impédance interne du générateur varie très fortement de R_s à R_{sh} (zone 3). C'est dans la zone 3 se situe le point de fonctionnement pour lequel la puissance fournie par le générateur est maximale. Ce point est appelé point de puissance optimale, caractérisé par le couple I_{max} , V_{max} et seule une charge dont la caractéristique passe par ce point, permet d'extraire la puissance disponible dans les conditions considérées.

Les deux types de regroupement sont en effet possibles et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaités. Ainsi, pour N_s cellules en série, constituant des branches elles même N_p en parallèles, la puissance disponible en série du générateur PV est donnée par :

$$P_{pv} = N_s \cdot V_{pv} \cdot N_p \cdot I_{pv} \quad (7)$$

Avec:

P_{pv} : La puissance disponible en sortie du GPV.

V_{pv} : la tension à la sortie du GPV.

I_{pv} : le courant de sortie du GPV.

d- Savoir lire une fiche technique [3]

Une fiche technique est une fiche où sont mentionnées les informations nécessaires d'un élément, pour sa bonne utilisation et pour un fonctionnement adéquat.

Une fiche technique sur un module photovoltaïque indique plusieurs informations qui diffèrent selon le fabricant après avoir été testé dans un laboratoire dans les conditions standards, telles que la tension à vide (V_{co}), le courant du court-circuit (I_{cc}), la puissance maximale (P_{max}), le rendement (η).

Exemple :

Fabricant : SolarIntegrated

Caractéristiques électriques			240	245	250
Puissance maximale sous conditions STC (+3/0 %)	P_{mp} (Wc)	1 → 235 →	240	245	250
Rendement sous conditions STC	η (%)	2 → 14,5 →	14,8	15,1	15,4
Facteur de forme	FF	3 → 0,752 →	0,753	0,757	0,757
Tension au point de puissance maximale	V_{mp} (V)	4 → 29,5 →	29,6	29,6	29,7
Courant au point de puissance maximale	I_{mp} (A)	5 → 7,97 →	8,12	8,27	8,43
Tension de circuit ouvert	V_{oc} (V)	6 → 36,9 →	37,0	37,0	37,1
Courant de court-circuit	I_{sc} (A)	7 → 8,47 →	8,61	8,75	8,91
Tension maximale UL/IEC	V_{max} (V) UL/IEC	8 →	600 / 1000		
Coeff. température au point maximal de puissance	$T_k P_{mp}$ (%/°C)	9 →	-0,41		
Coeff. température de tension de circuit ouvert	$T_k V_{oc}$ (%/°C)	10 →	-0,356		
Coeff. température de courant de court-circuit	$T_k I_{sc}$ (%/°C)	11 →	+0,062		
Temp. nominale de fonctionnement de la cellule	NOCT (°C)	12 →	49±2		

Figure I.12 : Extrait fiche technique

Cette fiche technique fournie à l'utilisateur des informations d'un module PV de puissance nominale de 240 Wc.

I.4 Les batteries

Le système de stockage est un élément crucial de l'installation photovoltaïque du point de vue technique, mais aussi du point de vue économique; car il représente 40 à 50 % du coût de l'installation. Vue l'importance du stockage électrochimique de l'énergie solaire, une étude théorique des différents types de batteries est menée, en particulier la batterie au plomb qui est la moins coûteuse comparativement aux autres batteries.

I.4.1 Définition

Une batterie est un ensemble d'accumulateurs électriques destinés à stocker de l'énergie et à la restituer ultérieurement. Elle est de type électrochimique et fonctionne grâce aux réactions électrochimiques de ses électrodes. Il y a donc une conversion de l'énergie chimique en énergie électrique.

I.4.2 Composition des batteries [4]

Un accumulateur électrochimique est composé de deux électrodes (cathode, anode) reliées à un circuit électrique extérieur et plongeant dans un compartiment rempli d'électrolyte.

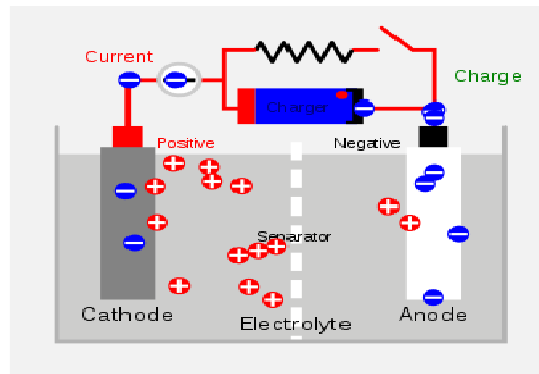


Figure I.13 : Composition de la batterie

- les deux électrodes sont faites de deux métaux différents.
- l'électrolyte est un conducteur ionique qui permet le transfert des ions entre les deux électrodes.

I.4.3 Principales caractéristiques des batteries

Le choix de la batterie est basé sur plusieurs critères :

- **Tension nominale** : c'est la force électromotrice de l'accumulateur en fonction du couple électrochimique utilisé, elle s'exprime en volts.
- **Tension de charge** : c'est la tension minimale à appliquer pour charger efficacement l'accumulateur, elle est exprimée en volts.
- **Capacité de la batterie** : la capacité C d'une batterie s'exprime en ampères heures (Ah). C'est la quantité de courant qu'elle peut fournir pendant un nombre d'heures précis, à une condition de température de référence (souvent à une température de 20°). La capacité C est donc le produit du courant de charge $I(A)$ par le temps de décharge $t(h)$.

$$C = I \cdot t \quad (8)$$

- **Nombre de cycle** : c'est l'aptitude de la batterie à supporter des cycles successifs de charge et de décharge. C'est une qualité essentielle pour un accumulateur de pouvoir être chargé un grand nombre de fois.
- **La profondeur de décharge** : c'est le rapport entre la quantité d'électricité déchargée à un instant t et la capacité de la batterie.
- **Autodécharge** : c'est la perte en pourcentage de la capacité de la batterie lorsque celle-ci n'est pas utilisée. Cette autodécharge augmente :
 - Avec le vieillissement de la batterie.
 - Avec la température.
 - Suite à un mauvais entretien.

- Suite à une décharge profonde ou une inversion de la polarité.

I.4.4 Différentes technologies de batteries [5]

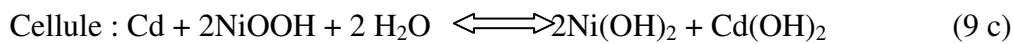
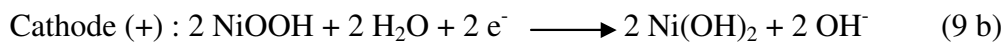
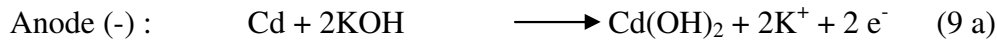
Plusieurs types de batteries sont conçus pour le stockage de l'énergie, en site les quatre types les plus utilisées sont comme suit :

a-La batterie Nickel-Cadmium (Ni-Cd)

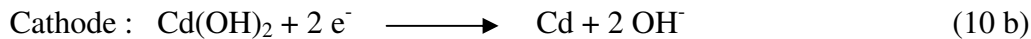
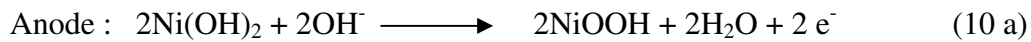
Le couple Nickel-Cadmium a été exploité pour la 1^{ère} fois en 1890 par Waldemar Junger, mise en service comme batterie au début du 20^{ème} siècle. Elle se base sur une électrode positive en NiOOH, l'électrolyte une solution alcaline (KOH à 22%) et l'électrode négative est en Cadmium (Cd).

Son fonctionnement est basé sur les deux phénomènes de la charge et de la décharge selon les réactions chimiques suivantes :

- **Processus de décharge :**



- **Processus de charge :**

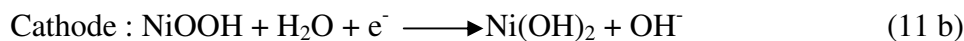
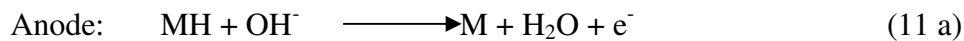


Durant la charge, l'électrolyse du H₂O est en compétition avec les réactions primaires.

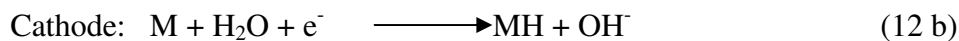
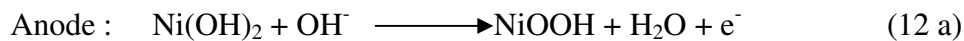
b-La batterie Nickel-Métal-Hydrure (Ni-MH)

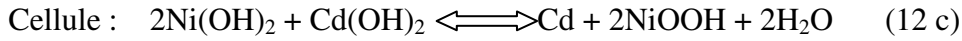
Afin de surmonter les limitations en capacité des batteries Ni-Cd, des recherches sur un nouveau couple Ni-MH ont commencé en 1967, en remplaçant le Cadmium de l'électrode négative par un composé intermétallique hydratante (MH). Les deux électrodes sont isolées électriquement l'une de l'autre par séparateur a fin d'éviter la mise en court circuit du système. L'électrolyte utilisé est le même que pour le Ni-Cd.

- **Processus de décharge :**



- **Processus de charge :**





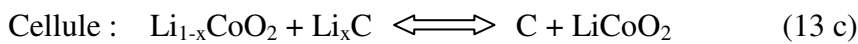
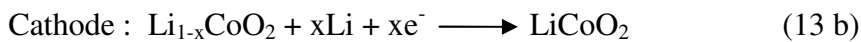
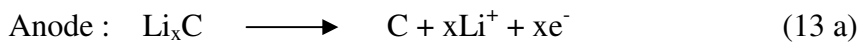
Cependant, l'instabilité et l'incertitude sur le nombre de cycle du Ni-MH rencontrée à ses débuts, ont conduit les scientifiques à développer une batterie pressurisée nickel-hydrogène (Ni-H₂) à la place.

c-La batterie lithium-ion (Li-Ion)

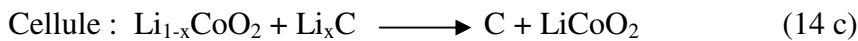
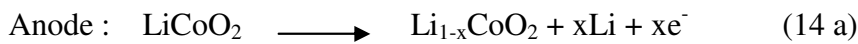
Les premières batteries commerciales en Li-Ion, n'ont vu le jour que depuis les débuts des 1990. Aujourd'hui, plusieurs variétés sont disponibles, les plus répandues sont Lithium-Ion (Li-Ion) et Li-Polymères (Li-Po).

Afin de mieux comprendre l'électrochimie d'un accumulateur Li-Ion, on suit les deux réactions chimiques de la décharge et de la charge suivantes :

- **Processus de décharge :**



- **Processus de charge :**



d- La batterie à l'Acide-Plomb [4]

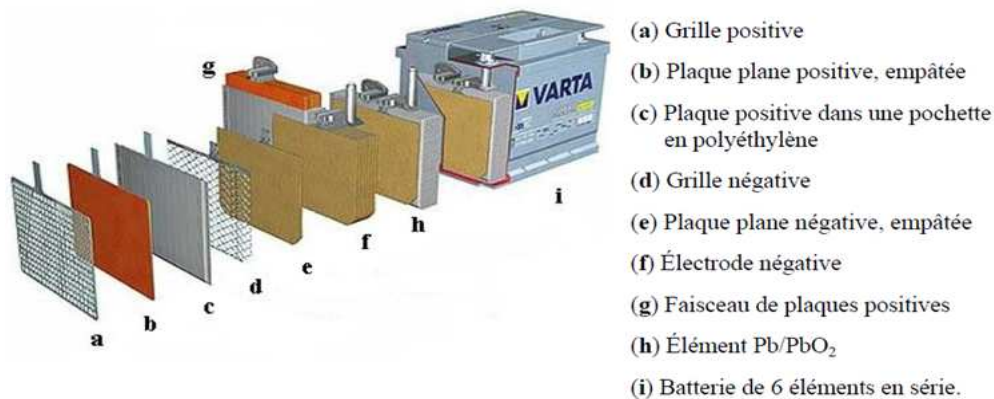
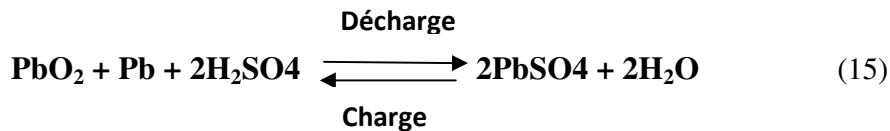


Figure I.14 : Structure d'une batterie acide-plomb classique

Les batteries de type acide-plomb sont les plus utilisées dans le stockage d'énergie électrique photovoltaïque, vu leurs coûts et leurs caractéristiques. Leurs fonctionnements se basent sur la réaction d'oxydoréduction suivante :



PbO₂ est l'électrode positive **pôle (+)**, Pb l'électrode négative **pôle (-)** tant qu'en charge ou en décharge, son électrolyte est de l'acide sulfurique (H₂SO₄).

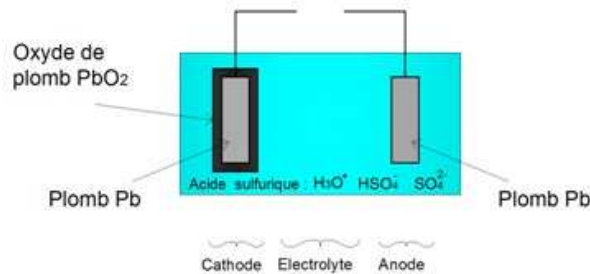


Figure I.15 : Composition de la batterie acide-plomb

I.4.5 Processus de décharge de la batterie Acide-Plomb

- Principe électrochimique de la décharge

Lors de la décharge, le plomb de l'anode s'oxyde en perdant deux électrons tandis que celui de la cathode en gagne deux lors de sa réduction. L'hydrogène apparu à l'anode et l'oxygène produit à la cathode se recombine en eau (H₂O).

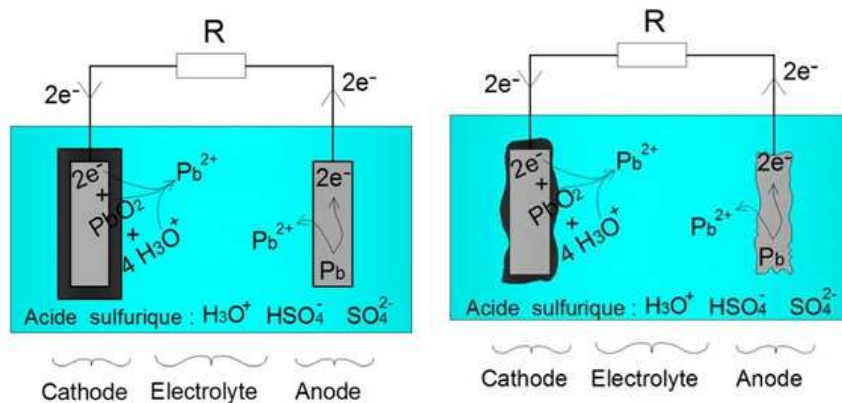
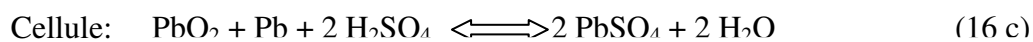


Figure I.16: Principe électrochimique de la décharge d'une batterie acide-plomb

L'anode en plomb perd donc petit à petit sa masse. Egalement la masse d'oxyde de plomb (PbO₂) diminue.

- **Décharge profonde et phénomène de sulfatation**

Les batteries acide-plomb sont vulnérables aux décharges profondes. Ainsi qu'expliqué précédemment, la décharge d'une batterie acide-plomb produit des ions Pb^{2+} . Ainsi, au cours de la décharge, on observe une augmentation de la concentration des ions Pb^{2+} au sein de l'électrolyte.

Or, les ions Pb^{2+} sont relativement peu solubles dans une solution d'acide sulfurique. Ces derniers réagissent pour former du sulfate de plomb $PbSO_4$, selon l'équation suivante :

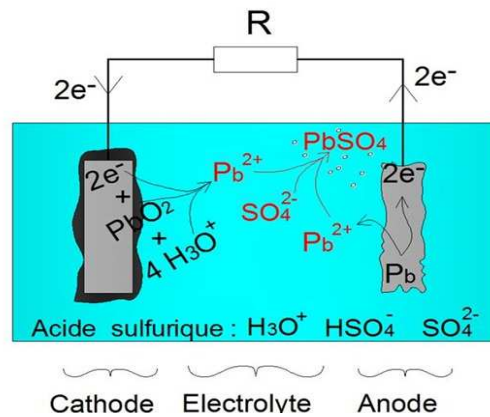


Figure I.17 : Production de sulfate de plomb $PbSO_4$ lors de la décharge d'une batterie

La sulfatation a lieu lorsqu'il devient impossible de dissoudre le sulfate de plomb par une charge normale des batteries, ce phénomène est problématique. En effet, le sulfate de plomb se présente sous la forme de cristaux solides qui viennent s'agréger au niveau des électrodes et se développent au cours des cycles de charge/décharge, et s'amplifie d'autant plus que la décharge est profonde, ce qui devient une couche isolante de sulfate de plomb et empêche les réactions chimiques de se produire.



Figure I.18 : Phénomène de la sulfatation

C'est pour cette raison qu'il est proscrit d'effectuer des décharges profondes à répétition. La limite de décharge est donc limitée à environ 70%.

- **Autodécharge**

Les batteries au plomb sont soumises à de phénomènes d'autodécharge qui provient des réactions d'oxydoréductions secondaires se produisant au niveau des électrodes. Contrairement à ce qui se passe au cours d'une décharge normale, les échanges d'électrons ont lieu entre oxydants et réducteurs d'une même électrode, sans transport de charge à travers l'électrolyte et donc sans génération de courant.

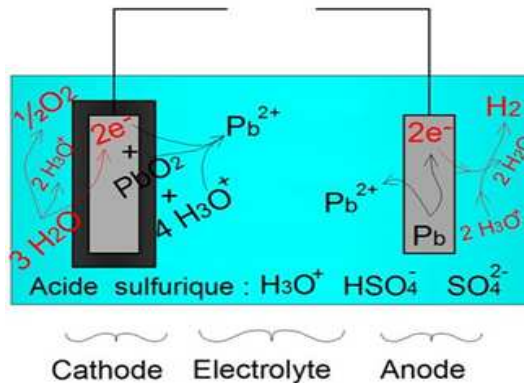


Figure I.19 : Phénomènes d'autodécharge

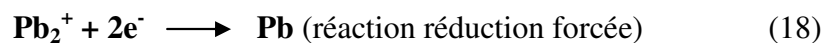
Lorsque la batterie est déconnectée (circuit ouvert), elle s'autodécharge. Ainsi, une batterie chargée qui ne serait pas sollicitée se retrouve complètement déchargée au bout de plusieurs mois.

I.4.6 La charge de la batterie Acide-Plomb

- **Principe électrochimique de la charge**

La charge d'une batterie consiste à réaliser la réaction chimique inverse de la décharge. Cette réaction inverse n'étant pas naturellement possible, il convient de réaliser ce qu'on appelle une réaction forcée. Pour cela, on utilise un générateur qui va forcer le passage des électrons dans le sens inverse : on appelle ce procédé **électrolyse**.

Les couples oxydants-réducteurs mis en jeu pour la charge sont les même que pour la décharge, c'est-à-dire les couples PbO_2/Pb_2^+ et Pb_2^+/Pb . Ainsi, l'oxydant le plus faible est l'ion plomb (Pb_2^+) qui va se réduire en plomb (Pb) selon la demi-équation de réduction suivante :



De même, le réducteur le plus faible est l'ion plomb (Pb_2^+). Celui-ci va s'oxyder en oxyde de plomb (PbO_2) selon la demi-équation d'oxydation suivante :

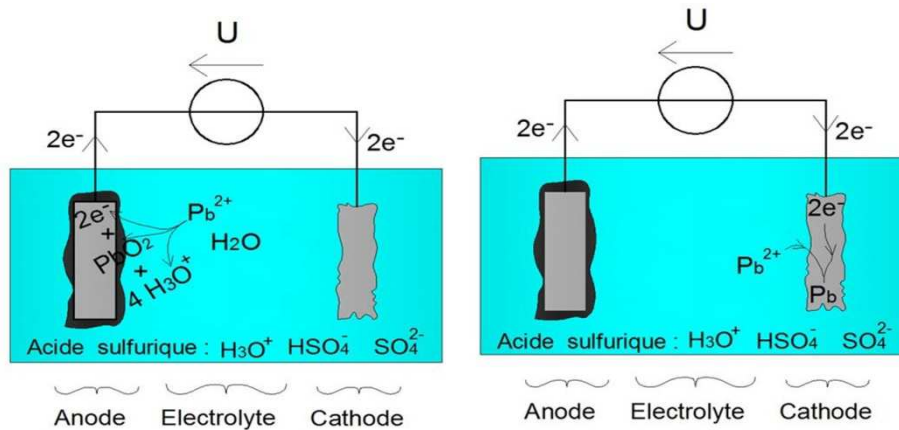
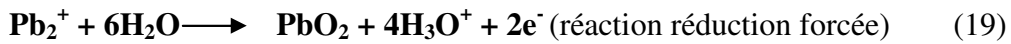


Figure I.20 : Principe électrochimique de la charge

On obtient la réaction d'oxydoréduction forcée suivante :



- **Stratification de l'électrolyte et surcharge**

- **Stratification** : Les ions présents dans l'électrolyte étant plus lourds que l'eau tendent à s'accumuler au fond, créant ainsi une stratification de la densité d'acide. Les conséquences sont une diminution de la conductivité dans les zones à faible densité d'acide, et une très forte accélération du phénomène de corrosion des grilles pour les zones à densité d'acide supérieure à 1.38. En conséquence, on assiste à un affaiblissement de la capacité de la batterie, et à un vieillissement précoce.

Un moyen pour lutter contre la stratification de l'électrolyte est l'application d'une légère surcharge.

- **Surcharge** : Lorsque la charge de la batterie est terminée, la concentration des ions Pb_2^+ au sein de l'électrolyte devient insuffisante. Ainsi, le générateur électrique ne contribue plus à charger la batterie mais une autre réaction susceptible de se produire, qui est l'électrolyse de l'eau avec un dégagement gazeux de dihydrogène et de dioxygène important et dangereux.

En fin de charge, la tension de charge aux bornes de la batterie est légèrement surélevée (de l'ordre de 2.3 V par éléments) afin d'accélérer l'électrolyse de l'eau et brasser l'électrolyte et d'éviter le phénomène de stratification de l'acide sulfurique. Ce phénomène est volontairement amplifié mais contrôlé par le régulateur en fin de charge.



Figure I.21 : Processus de surcharge

- **Vitesse de la charge**

La rapidité de la charge d'une batterie acide-plomb est limitée par la lenteur du phénomène de diffusion des réactifs au sein de l'électrolyte. Egalement, les réactions chimiques secondaires (comme l'électrolyse de l'eau) sont un obstacle à la rapidité de la charge.

I.4.7 Propriétés électrochimiques de la batterie Acide-Plomb

- **Tension**

La tension d'une batterie correspond à la tension à vide, c'est-à-dire lorsque le courant traversant la batterie est nul.

- **Caractéristique courant-tension :**

Lorsque la batterie est connectée à un récepteur, la tension et le courant, résultant de la connexion de ces deux éléments, dépendent de la caractéristique courant-tension de la batterie et celle du récepteur. Et comme la batterie ne se comporte pas électriquement de la même façon en charge et en décharge, Il est donc important de distinguer ces deux configurations.

- **Lors de la décharge de la batterie :**

Lors de la décharge, la batterie se comporte comme un générateur avec une résistance interne de valeur proche de 10 Ω , ce qui résulte la diminution de la tension de cette dernière lorsque le courant qu'elle débite augmente.

- **Lors de la charge de la batterie :**

Lorsque la batterie est en mode de charge, elle se comporte comme un récepteur au même titre qu'une résistance. Sa caractéristique courant-tension évolue en fonction de son état de charge, ainsi qu'illustré ci-dessous :

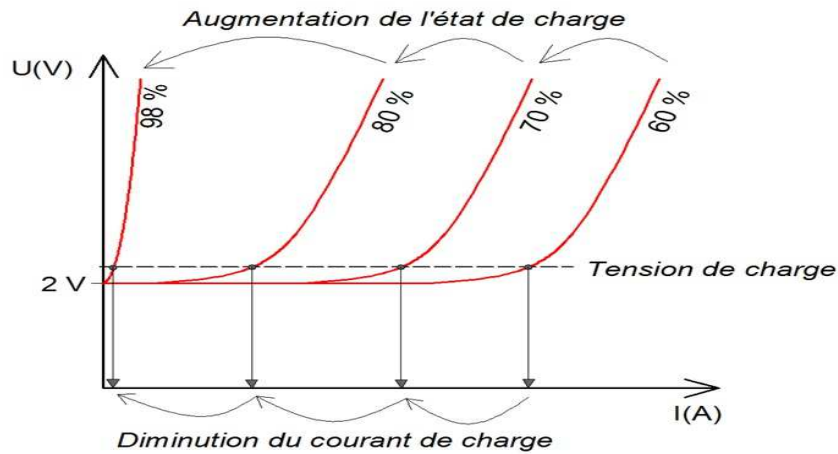


Figure I.22 : Evolution du courant de charge en fonction de l'état de charge

- **Capacité**

La capacité d'une batterie est la quantité d'énergie électrique qu'elle est capable de restituer après avoir reçue une charge complète, pour un courant de décharge donné, une température et une tension d'arrêt définies. Elle s'exprime par ampèreheure (Ah). Cette capacité diminue lorsque le courant de décharge augmente.

I.4.8 Entretien et maintenance de la batterie Acide-Plomb

Comme tout système la batterie plomb acide a besoin d'entretien qui se résume comme suit :

- Veiller à maintenir la batterie propre en l'a nettoyant assez fréquemment.
- Surveiller régulièrement le niveau de l'électrolyte qui doit se situer ± 2 cm au dessus des plaques.
- Ne jamais ajouter d'acide car seule l'eau s'évapore et employer uniquement de l'eau distillée lors d'appoints (pas d'eau du robinet donc).
- Veiller à une bonne connexion aux bornes et enduire celles-ci de vaseline neutre.
- Maintenir la batterie bien chargée (ne pas laisser les phares sans faire tourner le moteur par exemple).
- Lors d'une recharge, préférer un appareil à faible débit : plus la recharge sera longue plus elle sera efficace.

I.5 Le régulateur [3]

I.5.1 Définition d'un régulateur

D'un point de vue général, un régulateur est un outil permettant de maintenir l'état d'une grandeur égale à une valeur consigne.

Dans le système photovoltaïque, le régulateur est un composant très important pour contrôler l'état de la batterie (charge et décharge), puisque la tension fournie par le champ photovoltaïque est une grandeur fluctuante qui dépend des conditions climatiques.

I.5.2 Rôles de la régulation

Dans une installation photovoltaïque autonome, le régulateur doit assurer les deux fonctions essentielles qui sont la gestion de la charge et de la décharge des batteries.

- **Gestion de la charge**

Lors de la charge, les batteries sont soumises à plusieurs causes d'endommagement, le régulateur photovoltaïque doit protéger ces dernières contre ces risques de dégradation :

- pour éviter le dégazage par électrolyse de l'eau, le régulateur maintient la tension à 2.2 V par élément de batterie.
- Pour diminuer les risques de stratification de l'électrolyte donc la dégradation de la capacité réelle des batteries, le régulateur maintient la tension à la valeur de 2.3 V (par éléments de batterie), pendant un certain temps (environ 2 heures).
- Limitation du courant de charge pour éviter le courant de charge trop élevé.
- Le régulateur doit assurer le maintien en charge de la batterie lorsque celle-ci n'est pas sollicitée, pour éviter le phénomène de l'autodécharge des batteries.

- **Gestion de la décharge**

Lors de la décharge des batteries, le phénomène qui les endommage est la sulfatation, pour éviter ce phénomène le régulateur déconnecte le parc de batteries vis-à-vis des appareils électriques lorsque l'état de charge est trop bas, et la reconnexion s'effectue lorsque les batteries sont suffisamment chargées.

En général, la limite de décharge est de 70% (soit un état de charge de 30%). Ce paramètre est cependant réglable directement sur le régulateur ; ce qui évite le phénomène de sulfatation.

- **Indication de l'état du système**

En plus de la charge et de la décharge, le régulateur doit être en mesure de pouvoir afficher les paramètres d'état de l'installation photovoltaïque dont :

- Le courant du champ photovoltaïque qui varie en fonction des conditions climatiques et le courant appelé par les appareils électriques.
- Le courant du parc de batteries qui peut être positif ou négatif selon que les batteries sont en charge ou en décharge.

- le régulateur mesure la tension du système qui est constitué par le champ photovoltaïque, le parc de batteries et les appareils électriques. Comme ces trois éléments sont montés en parallèle, leur tension est la même. Donc le régulateur mesure la tension au niveau du parc de batteries ce qui permet de gérer la charge et la décharge de manière plus fine.

Egalement, un système d'acquisition et de sauvegarde des données journalières peut permettre d'analyser le comportement de l'installation depuis sa mise en service, cela permet de constater d'éventuelles anomalies de fonctionnement de l'installation:

- La production électrique photovoltaïque, en kWh.
- La consommation électrique journalière des équipements électriques, en kWh.
- Les tensions minimales et maximales journalières aux bornes de la batterie.

I.5.3 Historique des régulateurs

C'est en 1973, que fut construite la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques ainsi que les régulateurs.

Au début, les premiers régulateurs photovoltaïques sont assez simple en terme de conception : ce sont les régulateurs "tout ou rien". Ceux-ci tendent à disparaître depuis la fin des années 1990 mais sont encore très répandus sur les sites isolés existants.

Depuis la fin des années 1990, on assiste au développement de régulateurs photovoltaïques plus perfectionnés intégrant la technique MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion - En anglais Modulation de Largeur d'Impulsion) et PPM (Point de Puissance Maximul - En anglais MPT : Maximal Power Tracking).

- **Régulateur « tout ou rien » :** Lorsque le module photovoltaïque est branche aux bornes d'une batterie, le point de fonctionnement est déterminé par l'intersection entre les deux caractéristiques courant-tension ; Par conséquent, afin d'éviter d'endommager la batterie par dépassement de sa tension maximale admissible, il convient de déconnecter le module photovoltaïque. C'est ainsi que fonctionne le régulateur "tout ou rien" lors de la charge des batteries : soit il connecte le champ photovoltaïque au parc de batteries, soit il le coupe lorsque la tension devient trop importante.

- **Régulateur MLI :** Le régulateur MLI a été conçu, vers la fin des années 1990, afin de lever l'inconvénient majeur des régulateurs "tout ou rien" vis-à-vis de la fin de charge. Sa valeur ajoutée est donc une fin de charge optimale avec un état de charge de 100% (au lieu de 75% pour le régulateur "tout ou rien").

En début de charge, le régulateur MLI fonctionne comme le régulateur "tout-ou-rien". En fin de charge (à partir d'un état de charge de l'ordre de 70%), Le régulateur MLI est un hacheur qui abaisse la tension du champ photovoltaïque afin que celle-ci soit supportable par le parc de batteries.

- **Régulateur PPM :** C'est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Dans ce régulateur, un circuit mesure en permanence la tension et le courant du panneau pour tirer de l'énergie au point de puissance maximale. Ceci permet de garantir une récupération maximal d'énergie, quelque soient la température et l'ensoleillement. Ces régulateurs fonctionnent soit en élevant, soit en réduisant la tension. Un premier circuit ajuste la demande au point de puissance maximale de l'ensemble des panneaux et le deuxième circuit transforme le courant et la tension pour les adapter au type de batterie. Le régulateur MPPT coûte en général beaucoup plus cher qu'un régulateur standard. C'est pour cette raison que son utilisation n'est pas généralisée, et qu'il n'est pas recommandé pour les petites installations (les pertes ne sont pas assez importantes).

A ces quatre types de circuit on ajoute en général un régulateur de décharge pour empêcher les décharges profondes de la batterie.

I.5.4 Rendements des régulateurs

Les régulateurs photovoltaïques étant constitués de composants électroniques (transistors, diodes, bobines, condensateurs, etc.), une partie de la puissance électrique les transitant est donc dissipée sous la forme de chaleur.

En pratique, le rendement dépend du taux de charge du régulateur, ainsi qu'illustré sur la courbe de rendement ci-dessous :

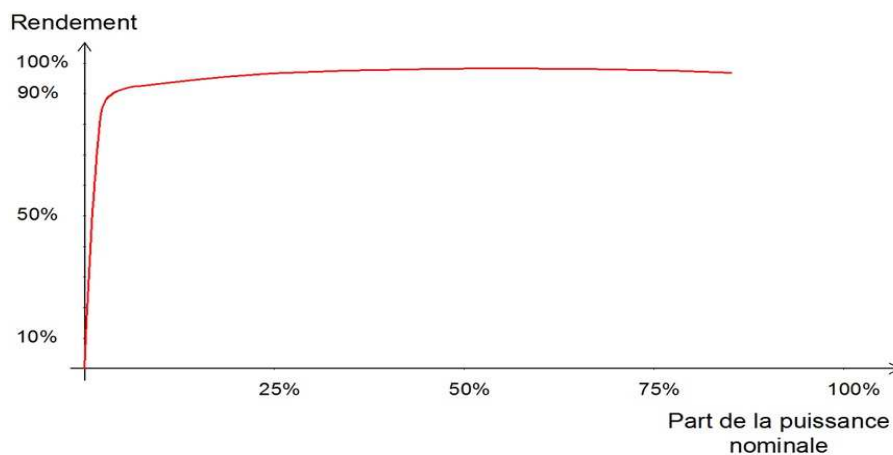


Figure I.23 : Courbe de rendement d'un régulateur MLI avec fonction MPPT

I.6 l'onduleur [3]

Un onduleur est un dispositif d'électronique de puissance qui permet de convertir une tension et un courant continus en une tension et un courant alternatifs. On distinguera donc toujours la partie continue notée CC (Courant Continu), en amont de l'onduleur, et la partie alternative notée CA (Courant Alternatif), en aval de l'onduleur.

I.6.1 Rôle de l'onduleur

Actuellement, la plupart des appareils électriques présents sur le marché étant adaptés à la tension alternative du réseau, les fabricants ne proposent pas d'équivalents révisés à la tension continue. De ce fait, la présence d'un onduleur devient incontournable afin de permettre à l'utilisateur un large choix pour ces équipements électriques.

Il convient de différencier deux grandes familles d'onduleurs :

- **Les onduleurs assistés par une source de tension alternative :** Ceux-ci convertissent un signal continu en un signal alternatif compatible avec cette source de tension, c'est-à-dire présentant les mêmes propriétés (valeur efficace, fréquence). Ces onduleurs sont utilisés dans le cas des installations photovoltaïques raccordées au réseau (l'onduleur fournit alors une tension alternative équivalente à la tension du réseau).

- **Les onduleurs autonomes :** Ceux-ci peuvent fonctionner sans la présence d'une source de tension alternative externe. Ils fournissent une tension alternative conforme à la demande de l'utilisateur.

I.6.2 dimensionnement de l'onduleur

- **Partie CC :** l'onduleur doit être adapté à la tension du système imposé par le parc de batteries. Les fabricants prévoient généralement des tensions d'entrée de 12 V, 24 V ou 48 V.

- **Partie CA :** l'onduleur imposera un signal de sortie adaptée aux appareils qu'il alimente, par exemple (cas général) :

- Tension alternative de fréquence 50 Hz
- Valeur de la tension efficace : $U_{\text{eff}} = 230 \text{ V}$

- **Puissance nominale :** L'onduleur doit être dimensionné de manière à ce que sa puissance nominale couvre la somme des puissances de tous les utilisateurs que l'on souhaite utiliser en même temps.

- **Courants de démarrage des appareils électriques :** L'onduleur doit être capable de délivrer un courant élevé pendant une période brève pour certains appareils électriques fonctionnant sous une tension alternative nécessite un fort courant au démarrage.

Les régulateurs ne sont pas en mesure d'absorber les forts courants de démarrage appelé côté CA. De ce fait, il est proscrit de connecter l'onduleur à une des sorties CC du régulateur. Il convient de le brancher directement sur les batteries, car les batteries jouent le rôle de tampon et sont en mesure de délivrer de forts courants d'appel.

I.6.3 Performance de l'onduleur

- **Rendement de l'onduleur :** L'onduleur, comme tout appareil électrique, est composé d'éléments électroniques (diodes, condensateurs, etc.) qui chauffent lors de son fonctionnement, donc une partie de la puissance continue en entrée de l'onduleur est donc dissipée sous forme de chaleur. On définit alors le rendement de l'onduleur comme le rapport de la puissance de sortie (alternative) sur la puissance d'entrée (continue):

$$\eta = (\text{Puissance alternative})/(\text{Puissance continue})$$

- **Effet de la température sur l'onduleur :** Un onduleur chauffe du fait de son rendement de conversion. Il faut alors évacuer cette chaleur afin de ne pas dépasser la température maximale de son fonctionnement. L'évacuation peut se faire simplement par convection naturelle pour les onduleurs de petite puissance ou par présence de ventilateur pour les onduleurs de plus grosses puissances, et la présence de ce dernier introduit une consommation supplémentaire qui pénalise légèrement le rendement globale du système. Dans tous les cas, l'onduleur doit se situer dans un local bien ventilé.

En général, la plage de température de fonctionnement d'un onduleur est comprise entre -25°C et 60 °C.

Lorsque la température de l'onduleur dépasse la valeur maximale, l'onduleur limite volontairement la puissance délivrée (afin de protéger les composants contre toute surchauffe). L'onduleur continue donc de fonctionner mais limite le courant des équipements électriques. Par ailleurs, un fonctionnement sous une température continuellement élevée réduit la durée de vie de l'onduleur.

Lorsque la température de l'onduleur est inférieure à la température minimale, l'onduleur ne se met pas en marche.

- **Consommation en veille :** Beaucoup d'onduleurs continuent à consommer du courant alors que tous les appareils électriques sont éteints. Afin d'économiser l'énergie des batteries, il est préférable de sélectionner un onduleur qui présente la fonction stand-by (consommation en mode d'attente). Avec cette fonction, l'onduleur s'arrête et se met automatiquement en mode de recherche de charge. L'onduleur se remet en marche dès qu'un appel de puissance est détecté côté CA.

I.7 La charge

La charge est l'équipement électrique alimenté par le système, pouvant être de type continu comme des équipements de télécommunications, le pompage d'eau, ou de type alternatif dans les cas d'usage domestique (maison solaire), ce cas nécessite un onduleur.

I.8 Conclusion

Plusieurs technologies ont vu le jour pour réaliser un système PV, et chaque élément constituant le système a ces avantages et ces inconvénients. Le choix de ces composants est basé sur leur rendement. La deuxième partie est consacrée au dimensionnement de ces derniers ainsi que leurs rendements.

I.1 Introduction

Le dimensionnement d'une installation photovoltaïque nécessite plusieurs études sur les différents paramètres qui la compose, comme les dimensions du champ PV, des batteries, de l'onduleur et du régulateur ainsi que les câbles reliant tous ces composants.

Mais avant tout, il est nécessaire de connaître l'irradiation solaire du site de cette installation qui est la source d'énergie de cette dernière.

I.2 Modélisation du gisement solaire [6]

Le gisement solaire est composé de plusieurs irradiances selon différents paramètres comme la position et la distance de la terre par rapport au soleil, le mouvement de la terre, l'atmosphère et surtout du milieu. Dans le système photovoltaïque, le rayonnement solaire diffère selon le positionnement du plan.

II.2.1 Reconstitution du rayonnement sur un plan horizontal

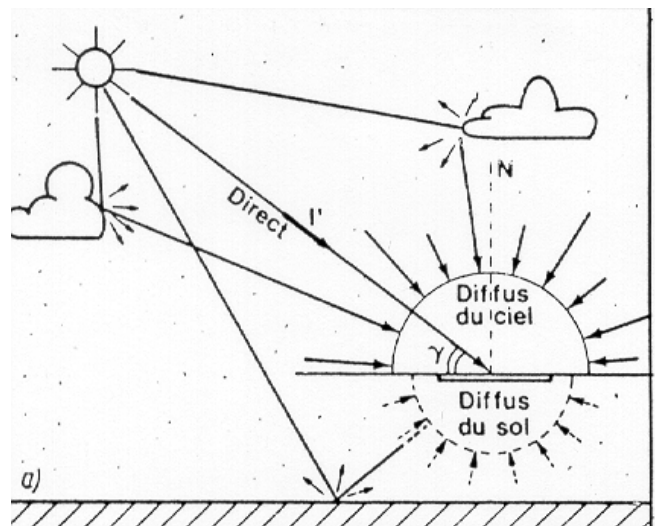


Figure II.1 : Composantes de rayonnements solaires sur un plan horizontal

Le rayonnement solaire subit plusieurs modifications en traversant l'atmosphère ce qui réduit son spectre de diffusion et se décompose en trois composantes :

- **Rayonnement direct** : c'est le rayonnement reçu directement du soleil sans être subit des modifications par l'atmosphère. Il est donné par l'équation suivante :

$$BH = B_n \sinh \quad (II.1)$$

Avec :

BH : l'éclairement dû au rayonnement direct calculé sur un plan horizontal.

B_n : l'éclairement dû au rayonnement direct.

h : la hauteur du soleil.

- **Rayonnement diffus** : c'est l'ensemble des rayonnements diffusés dû aux différents types de diffusion du rayonnement causés par les phénomènes atmosphériques. Le calcul du rayonnement diffus sur un plan horizontal est donné par :

$$DH = Dr + Da + Dm \quad (II.2)$$

Ou :

Dr : L'irradiation diffuse provenant de la diffusion de Rayleigh.

Da : L'irradiation diffuse provenant de la diffusion par les aérosols.

Dm : L'irradiation diffuse issue du phénomène de multi réflexion terre atmosphère.

- **Rayonnement global** : c'est la somme de tous les rayonnements captés par le plan horizontal. Il est donné par l'équation suivante :

$$GH = BH + DH \quad (II.3)$$

Avec :

BH : L'éclairement dû au rayonnement direct sur un plan horizontal.

DH : L'éclairement dû au rayonnement diffus sur un plan horizontal.

II.2.2 Reconstitution du rayonnement sur un plan incliné

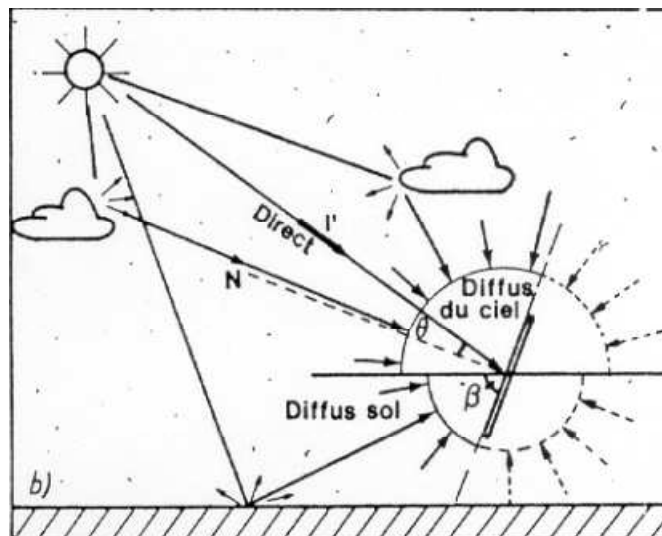


Figure II.2 : Composantes de rayonnements solaires sur un plan incliné

Un plan incliné est caractérisé par son inclinaison β par rapport à l'horizontale, et son orientation γ qui est l'angle entre la normale au plan incliné et le plan méridien du lieu par rapport au sud. L'angle d'incidence α est l'angle formé entre la normale du plan et les rayons du soleil Figure II.2. On parle souvent d'incidence normale lorsque $\alpha=0$, c'est-à-dire les rayons sont perpendiculaires aux plan.

L'angle d'incidence s'écrit, en fonction de la position du soleil (HS, AZ) :

$$\cos \alpha = \cos \beta * \sin HS + \sin \beta * \cos HS * \cos AZ - \gamma \quad (II.4)$$

avec:

HS : l'angle formé par le plan horizontal au lieu d'observation et la direction du soleil.

AZ : l'angle formé par la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal et la direction sud de se repère.

Le rayonnement sur un plan incliné est composé de trois types de rayonnement :

- **Rayonnement direct** : il est donné par la relation suivante :

$$I_{ni} = I_n \times \cos\theta_i \quad (\text{II.5})$$

Avec :

θ_i : l'angle d'incidence du rayonnement solaire sur un plan incliné.

I_n : l'éclairement dû au rayonnement direct sur un plan incliné.

- **Rayonnement diffus** : donné par l'équation suivante :

$$I_{di} = I_d \times (1 + \cos\beta) / 2 \quad (\text{II.6})$$

Avec :

β : l'angle d'inclinaison du plan incliné.

I_d : l'éclairement dû au rayonnement diffus sur un plan incliné.

- **Rayonnement réfléchis** : exprimé par l'équation :

$$I_{ri} = (I_n \sin h + I_d) \times \rho \times (1 + \cos\beta) / 2 \quad (\text{II.7})$$

Où :

ρ : Albédo du sol

• **Rayonnement global** : c'est la somme de tous les rayonnements captés par le plan horizontal. Il est donné par l'équation suivante :

$$I_{gi} = I_{ni} + I_{di} + I_{ri} \quad (\text{II.8})$$

II.3 Modélisation du système photovoltaïque

Le système photovoltaïque est conçu pour convertir l'énergie solaire en énergie électrique avec différentes technologies.

Un panneau photovoltaïque est composé de plusieurs modules qui sont l'assemblage en série et/ou en parallèle des cellules PV pour obtenir des caractéristiques électriques maximales.

Une cellule PV est modélisée sous un schéma électrique équivalent de deux manières :

II.3.1 Modèle à une diode [7]

La cellule PV est représentée par le circuit électrique équivalent de la figure qui se compose de:

- Une diode ;
- Une source de courant du flux lumineux ;
- Une résistance shunt pour représenter le courant de fuite dans la diode ;
- Une résistance série pour représenter les pertes en tension.

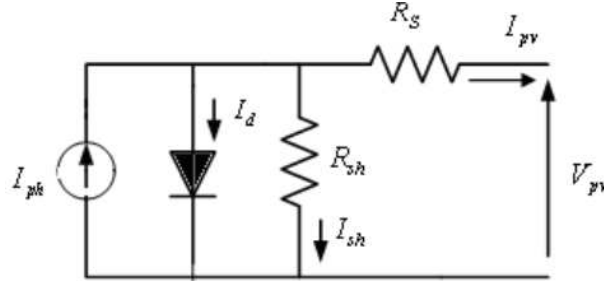


Figure II.3 : Schéma équivalent d'une cellule PV avec une seule diode

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (II.9)$$

En remplaçant le courant de la traversant la diode l'équation devient :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{V_t n}\right) - 1 \right) - \frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{R_{sh}} \quad (II.10)$$

La caractéristique I(V) et P(V) sont représentées par la figure

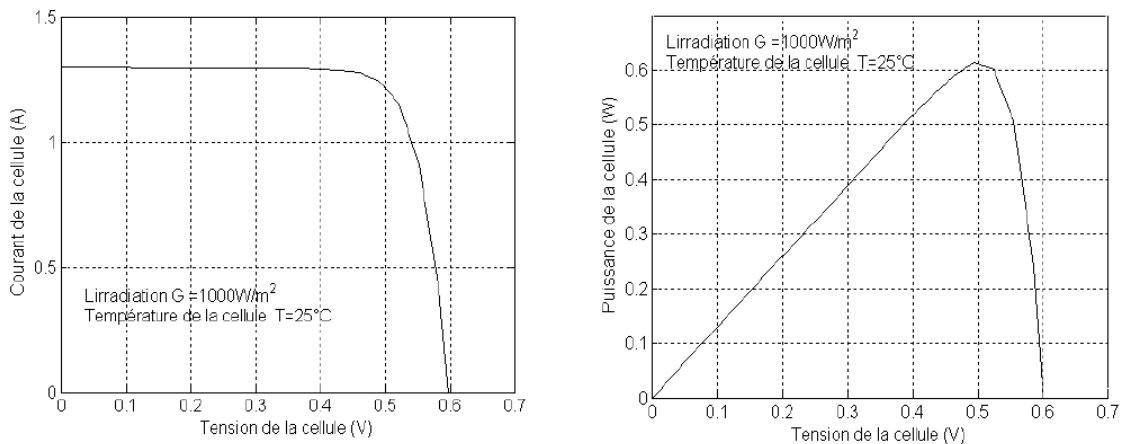


Figure II.4 : Caractéristique I(V) et P(V) d'une cellule photovoltaïque à une seule diode

II.2.2 Modèle à deux diodes

Il consiste en la description mathématique d'un circuit réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes ayant les courants de saturation I_{s1} et I_{s2} , une source de courant produisant un photo-courant I_{ph} , qui dépend de l'éclairement solaire, ainsi que les deux résistances série et shunt pour représenter les pertes en courant.

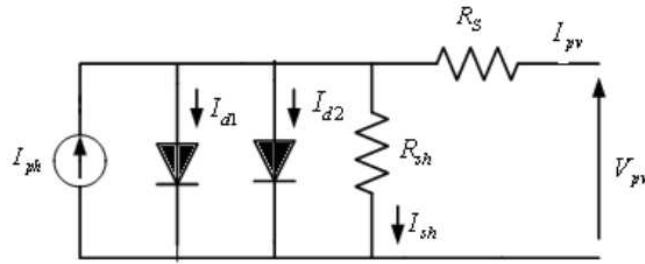


Figure II.5 : Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{sh} \quad (II.11)$$

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{s1} \left(\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{V_t n_1}\right) - 1 \right) - I_{s2} \left(\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{V_t n_2}\right) - 1 \right) - \frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{R_{sh}} \quad (II.12)$$

La caractéristique I(V) et P(V) sont représentées par la figure

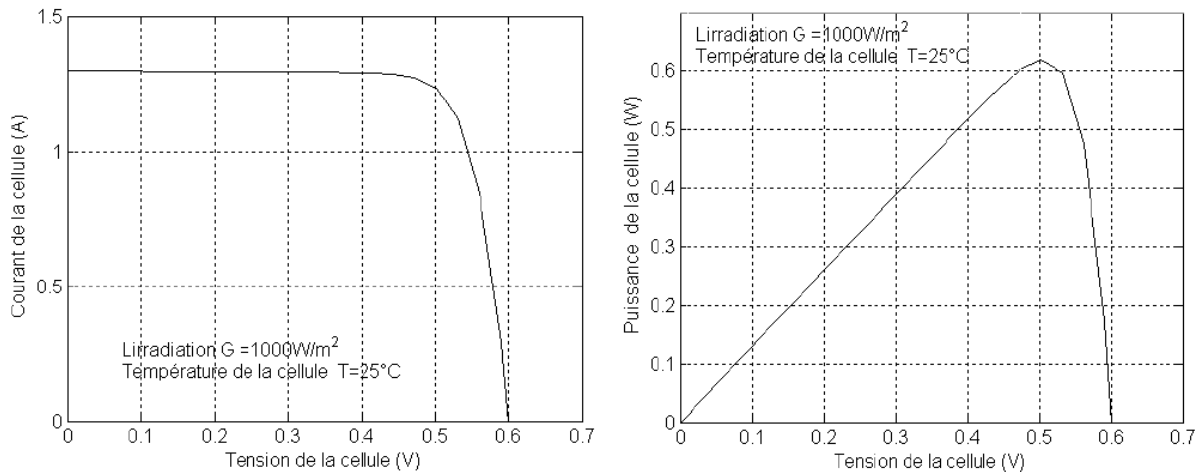


Figure II.6 : Caractéristique I(V) et P(V) d'une cellule photovoltaïque avec deux diodes

Remarque : les caractéristiques I(V) et P(V) des deux modèles sont presque identiques, mais le modèle à deux diodes est le plus utilisé. La deuxième diode mise en parallèle prend en compte la différence dans l'écoulement du courant de basse valeur due à la recombinaison de charges dans la région de la zone de charge d'espace du semi-conducteur ; ce qui fournit plus de précision aux deux courbes.

II.4 Définition du besoin électrique [3]

Avant le dimensionnement du champ photovoltaïque et du parc de batteries, la définition du besoin électrique est nécessaire pour éviter les défauts de fonctionnement de l'installation et le coût élevé de cette dernière.

Cette définition est réalisée à partir d'un inventaire de la consommation de tous les appareils électriques et d'une méthode de calcul des besoins électriques.

II.4.1 Inventaire des appareils

L'installation photovoltaïque est conçue pour alimenter plusieurs appareils électriques. Pour cela voici quelques uns et leurs consommations :

- **Eclairage** : plusieurs moyens sont utilisés pour transformer l'énergie électrique en énergie lumineuse, le tableau suivant résume quelques ampoules d'éclairage et leurs consommations électriques.

Types d'ampoules	Sa puissance électrique
Lampe à incandescence à filament	30 W à 100 W
Ampoule fluorescente compacte	1 W à 50 W
Tubes fluorescents	10 W à 60 W

Tableau II.1 : Exemples d'ampoules électriques et leurs puissances.

- **Équipement courant à faibles puissance électrique**

Types d'appareils	Leurs puissances électriques
Réfrigérateur	100 W à 300W
Télévision	110 W
Ordinateur	90 W

Tableau II.2 : Exemples d'appareils à faible puissance.

- **Équipement courant à forte puissance électrique**

Types d'appareils	Leurs puissances électriques
Cuisinière électrique	2 600 W à 3 400 W
Fer à repasser	1500W
Machine à laver	2500 W

Tableau II.3 : Exemples d'appareils à forte puissance.

II.4.2 Calculs des besoins électriques

Une fois l'inventaire des appareils est fait, un calcul des besoins électriques est nécessaire pour avoir l'énergie totale journalière consommées par ces derniers, pour cela une estimation de la durée d'utilisation journalière de chaque appareil doit être effectuée. Le produit de la puissance électrique (W) par la durée d'utilisation (h) donne l'énergie consommée (Wh) de chaque appareil, enfin la somme de ces énergies calculées évalue le besoins électrique, qui s'exprime en Wh/jour, d'une maison. L'exemple du tableau suivant donne le besoins électriques de quelques appareils :

Une consommation électrique (Wh)=Puissance (W)*Temps d'utilisation (h) (II.13)

Appareil électrique	Puissance nominale (en W)	Durée d'utilisation journalière (en h/jour)	Consommation d'énergie journalière (en Wh)
6 lampes fluo compacte 15 W chacune	$6 \times 15 = 90$ W	4 h/jour	360 Wh/jour
Ordinateur	150 W	2 h/jour	300 Wh/jour
1 Réfrigérateur	150 W	6 h/jour	900 Wh/jour
1 Chargeur pour téléphone portable	5 W	1 h/jour	5 Wh/jour
Lave-linge (5 kg)	640 W	1 h/jour	640 Wh/jour
Four micro-ondes	850 W	0.15h/jour	127.5 Wh/jour
1 Télévision	110 W	5 h/jour	550 Wh/jour
TOTAL			2882.5 Wh/jour

Tableau II.4 : Exemple de calcul du besoin électrique d'une maison

II.5 Evaluation du gisement solaire locale [6]

L'objectif de l'évaluation du gisement solaire est de caractériser le profile de l'ensoleillement en un endroit bien précis pour une installation photovoltaïque, en étudiant la répartition annuelle de l'irradiation solaire.

Avant cette évaluation, la définition de L'éclairement solaire et de L'irradiation solaire et nécessaire.

- **L'éclairement solaire** : c'est le flux énergétique issu du rayonnement solaire incident reçu par unité de surface. Exprimé en W/m^2 .

- **L'irradiation solaire** : c'est la quantité d'énergie solaire horaire issue du rayonnement solaire incident par unité de surface. Exprimé en Wh/m^2 ou en J/m^2 .

II.5.1 Influence de la localisation sur le gisement solaire

La répartition du rayonnement solaire sur la surface de la terre dépend de plusieurs paramètres :

- **La longitude** : elle correspond à l'angle formé par deux plans méridiens, l'un étant le méridien de Greenwich 0° et l'autre dépend du lieu envisagé.

On affecte du signe (+) les méridiens situés à l'est de ce méridien, et du signe (-) les méridiens situés à l'ouest.

- **La latitude** : La latitude d'un lieu à la surface de la terre est l'angle entre l'équateur et le rayon de la terre passant par le lieu considéré. La latitude est comptée de 0° à $+90^\circ$ dans l'hémisphère nord.

La latitude a aussi un effet important :

- Les journées estivales s'allongent à mesure qu'on s'éloigne de l'équateur, et le soleil est plus bas au midi solaire.
- Les journées d'hiver sont plus courtes, et le soleil encore plus bas qu'à l'équateur.

Autrement dit, l'intensité maximale (à midi) et la quantité totale de rayonnement solaire sur un plan horizontal diminuent à mesure qu'augmente la latitude.

- **L'altitude** : L'altitude d'un point correspond à la distance verticale entre ce point et une surface de référence théorique (niveau moyen de la mer), on l'exprime généralement en mètre.

- **La nébulosité** : est également une variable, les zones arides à très faibles nébulosité sont les plus soumises aux fortes irradiations solaires.

- **L'Air mass** : La part 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 Figure II.7. Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans le ciel clair est de $1000(W/m^2)$ et est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1).

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 $1000(W/m^2)$.

Les scientifiques ont donné un nom au spectre standard de la lumière du soleil sur la surface de la terre : AM1,5G : rayonnement « global » incluant rayonnement direct et rayonnement diffus.

Où :

AM 1,5 D : tient compte seulement du rayonnement direct.

Le nombre 1,5 indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1,5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith (correspondant à une inclinaison du soleil de 45° par rapport au zénith).

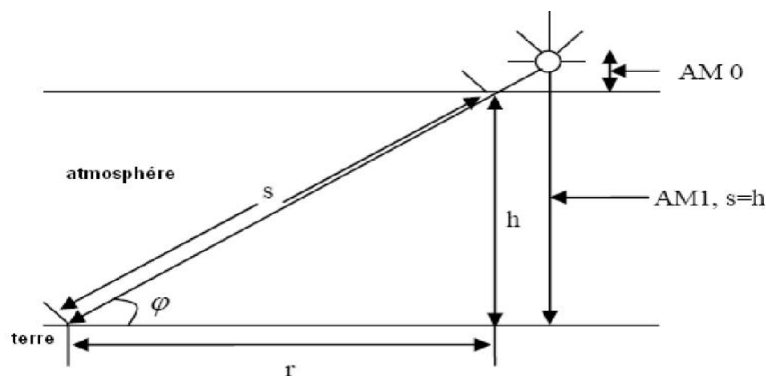


Figure II.7 : Définition de l'air masse

II.5.2 Angle d'inclinaison optimale du module PV

L'inclinaison correspond à la pente du panneau PV par rapport à l'horizontale. Elle se mesure en « ° ».

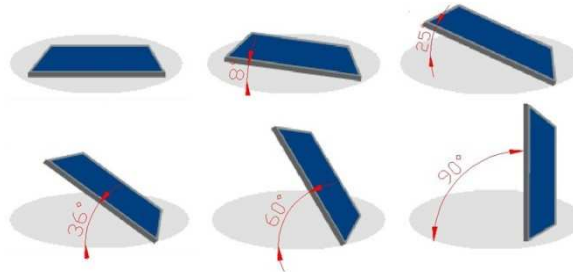


Figure II.8 : Les inclinaisons possibles des panneaux PV

L'inclinaison est un paramètre très important dans une installation PV autonome, elle correspond à la pente du module par rapport à l'horizontale. La formule de calcul de l'inclinaison optimale est donnée par :

Pour maximiser l'irradiation solaire reçue en hiver et l'orientation est plein sud :

- **Inclinaison optimale = Latitude du lieu +10° (II.14)**

Si l'orientation n'est pas plein sud :

- **Inclinaison optimale = (Latitude du lieu +10°)* (1 – orientation/180°) (II.15)**

II.5.3 Orientation du module PV

Les panneaux solaires sont plus productifs quand ils sont orientés plein sud dans l'hémisphère nord et plein nord dans l'hémisphère sud, pour capter l'énergie quotidienne maximale, quelle que soit la saison et l'heure de la journée.

II.6 Qualité d'une installation photovoltaïque autonome [3]

Le rendement d'une installation photovoltaïque exprime le rapport entre l'énergie électrique fournie par le panneau et l'énergie solaire reçue par ce dernier.

$$\eta = (\text{Puissance électrique fournie}) / (\text{Puissance solaire reçue}). \quad (\text{II.16})$$

Le rendement d'une installation photovoltaïque est d'environ de 10 %, ce qui signifie que 10% uniquement de l'énergie solaire reçue par le module sont transformées en énergie électrique, les 90% restantes sont perdues sous forme de chaleur et de réflexion lumineuse. Ce rendement diminue encore à la sortie de l'installation photovoltaïque, à cause des pertes dues

au différents constituants de cette installation (batteries, régulateurs, onduleurs, câble ...), ainsi qu'illustré sur la figure ci-dessous :



Figure II.9 : Rendement global & Différentes pertes au sein d'une installation photovoltaïque autonome

II.6.1 Rendement des modules

Le rendement des modules photovoltaïques diffère selon la technologie utilisée pour la conception des cellules. Le tableau II.5 résume l'estimation approchée du rendement des cellules PV.

TECHNOLOGIE DES CELLULES PV	RENDEMENT
Silicium mono cristallin	Entre 14 % et 19 %
Silicium poly cristallin	Entre 10 % et 15 %
Silicium amorphe	Entre 5 % et 10 %

Tableau II.5 : Rendement d'une cellule PV selon sa technologie

Comme indiqué dans le chapitre I, le module PV est constitué de cellules PV montées en série et /ou en parallèle ; mais le rendement du module est inférieur au rendement de l'ensemble des cellules qui le constitue.

Le rendement de la cellule est donné par : $\eta_{cellule} = \frac{\text{puissance électrique fournie}}{S_{cellule} * \text{puissance radiative reçue}}$ **(II.17)**

Avec $S_{cellule}$ est la surface de la cellule exposée au rayonnement solaire.

Le rendement du module est donné par : $\eta_{module} = \frac{\text{puissance électrique fournie}}{S_{module} * \text{puissance radiative reçue}}$ **(II.18)**

avec S_{module} est la surface du module exposée aux rayons du soleil :

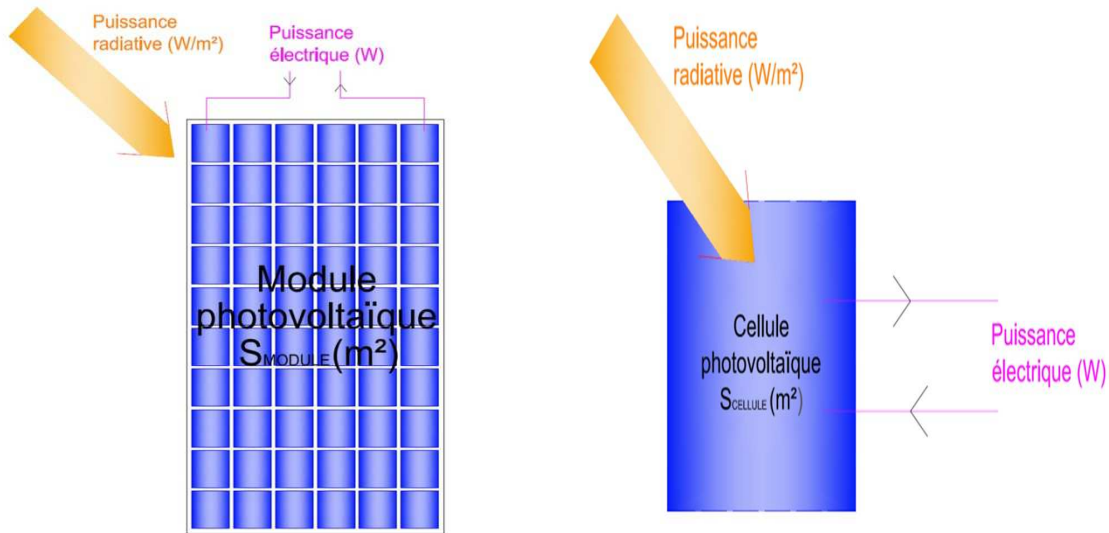


Figure II.10 :D'une cellule et d'un module exposés au rayonnement solaire

La figure II.10 montre que la surface du module est supérieure à celle de l'ensemble des cellules qui le compose ; ce qui explique la différence du rendement de ces derniers qui est causé par l'espace vide entre les cellules, et donc une perte du rendement.

Un autre facteur très important qui influence le rendement du module PV qui est la température.

En théorie, le rendement est estimé dans les Conditions Standards de Test (STC) : niveau d'éclairement $P_i=1000 \text{ W/m}^2$, Température de cellule 25°C , $AM=1.5$; dans ce cas la puissance électrique fournie par le module est la puissance crête.

Le rendement est donné par :

$$\eta_{Module,STC} = \frac{P_C}{\underbrace{P_{i,STC}}_{1\,000\text{ W/m}^2} \times S_{Module}} \quad (\text{II.19})$$

En pratique la température de la cellule est de l'ordre de 55°C , ce qui diminue le rendement du module. Dans ce cas le rendement est donné par :

$$\eta_{Module,50^\circ\text{C}} = \frac{P_{50^\circ\text{C}}}{\underbrace{P_{i,STC}}_{1\,000\text{ W/m}^2} \times S_{Module}} \quad (\text{II.20})$$

On constate donc que la température des cellules joue un rôle important dans la performance de l'installation photovoltaïque. Une bonne ventilation de la toiture photovoltaïque est donc essentielle afin de garantir une bonne qualité l'installation.

II.6.2 Pertes par échauffement des câbles

Un câble électrique est caractérisé par sa résistance électrique (R) exprimée en ohm (Ω) qui diffère selon la matière utilisée, cette résistance dépend de la résistivité (ρ), la longueur (L) et la section (S) du câble suivant cette équation :

$$R = \rho \times L / S \quad (\text{II.21})$$

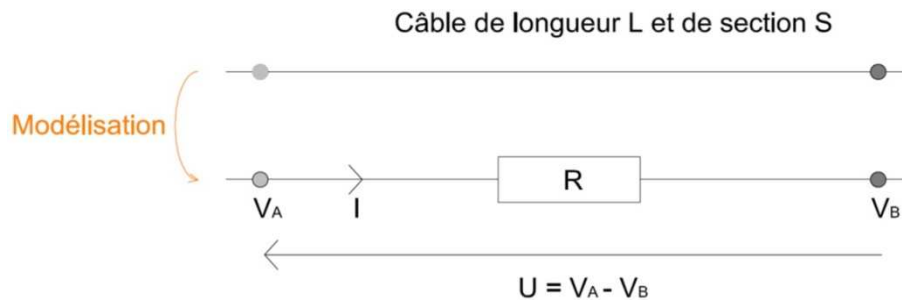


Figure II.11 : Modélisation électrique d'un câble

La tension (U) au borne du câble est donnée par :

$$U = V_A - V_B = R \times I \quad (\text{II.22})$$

La résistance du câble, définie ci-dessus, va provoquer une chute de potentiel entre le départ du câble et la fin du câble.

En pratique, un système de qualité est dimensionné pour limiter les pertes ohmiques dans le câblage Courant Continu (CC) à une chute de tension de maximum 2% entre les modules et l'onduleur. Si la chute de tension est supérieure à 2% (par exemple due à une longueur de câble trop importante), il faudra augmenter la section du câblage CC pour éviter l'échauffement des câbles.

II.6.3 Rendement du régulateur

Comme indiqué dans le chapitre I, Les régulateurs photovoltaïques perdent une partie de la puissance électrique sous forme de chaleur.

Le rendement des régulateurs dépend de leurs technologies:

Technologie du régulateur	Rendement moyen
Tout-ou-rien	Entre 97 % et 100 %
MLI	Entre 95 % et 98 %
MLI + MPPT	Entre 90 % et 95 %, mais la fonction MPPT permet d'améliorer le rendement du champ photovoltaïque

Tableau II.6: Rendement moyen d'un régulateur photovoltaïque

II.6.4 Pertes par absence du MPPT

Le régulateur MPPT est connecté au panneau solaire pour augmenter la puissance maximale de 20 à 30% de son rendement. La figure II.12 représente la différence de la puissance avec et sans le régulateur MPPT.

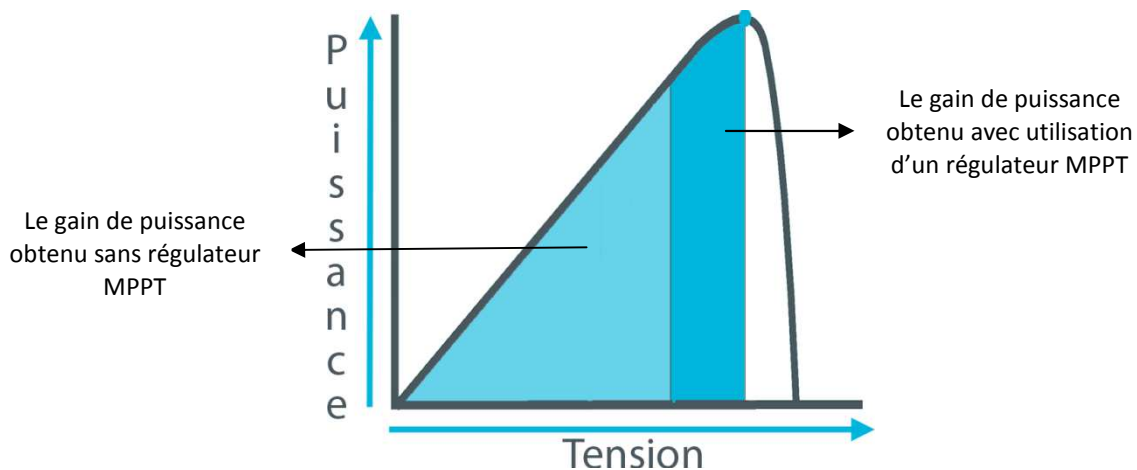


Figure II.12: Gain de puissance avec ou sans régulateur MPPT

II.6.6 Rendement des batteries

Plusieurs facteurs électrochimiques influencent le rendement des batteries :

- L'efficacité de la recharge qui est le rapport de la capacité de restituée et la capacité chargée.
- Phénomène lié à la loi de Peukert qui permet de calculer l'énergie totale fournie par une batterie, représentée par :

$$C_p = I^k t \quad (\text{II.23})$$

Avec :

C_p : est la capacité selon Peukert (Ampères-heures).

I : le courant de décharge (Ampères).

t : le temps de décharge (heures).

- L'autodécharge des batteries.

Avec tous ces phénomènes, le rendement des batteries s'estime aux environs de 85%.

II.6.7 Rendement de l'onduleur

Le rendement d'un onduleur est réduit d'environ 5% à cause de ses composants électriques qui dissipent une énergie sous forme de chaleur, mais aussi de la tension et de la puissance d'entrée, c'est-à-dire que 95% de la puissance continue générée par le panneau PV est transformée en puissance alternative en sortie de l'onduleur.

II.6.8 Autres pertes

En plus de toutes les pertes d'énergie électrique dus aux différents composants du système PV, d'autres pertes surgissent au cours de cette installation, estimées à 2%, comme :

- La différence de production d'une cellule à une autre dans le même module PV.
- La puissance crête des modules qui est estimée avec une marge d'erreur de $\pm 3\%$.

II.6.9 Le ratio de performance PV

Le ratio de performance, noté PR (Performance ratio), est un indice de performance qui désigne le rapport entre le rendement énergétique réel et le rendement théorique. Il est indiqué en pourcentage, plus sa valeur est proche de 100% plus l'installation est performante.

$$PR = \frac{\text{rendement réel}(KWh)}{\text{rendement théorique}(KWh)} \quad (\text{II.24})$$

Appelé aussi facteur de qualité, il permet de mesurer la qualité d'une installation PV et de quantifier les pertes électrique de l'installation.

II.7 Dimensionnement du champ PV [3]

Après évaluation des besoins électriques d'une installation PV et estimation des pertes électriques de ses différents éléments, il s'ensuit le dimensionnement du champ PV qui consiste à calculer la puissance crête nécessaire au bon fonctionnement de l'installation.

II.7.1 Formule de calcul de la puissance crête photovoltaïque

La puissance crête, exprimée en Watt crête (W_c), est la puissance maximale que peut délivrer les cellules, modules ou champ photovoltaïque dans les conditions optimales de mesure qui sont :

- L'irradiation solaire de puissance de 1000 W/m^2 .
- La température des panneaux à 25°C .
- Un rayonnement solaire traversant 1,5 fois l'épaisseur de la couche atmosphérique (AM 1,5).

L'énergie électrique délivrée par un module PV est définie par l'équation :

$$E_{\text{Elec}} = P_c/P_i \times E_i \times PR \quad (\text{II.25})$$

Avec :

- E_{Elec} : l'énergie électrique journalière produite par le champ PV (kWh/jour).
- P_c : la puissance crête du champ PV.
- P_i : la puissance radiative (KW/m^2).
- E_i : l'irradiation solaire journalière reçue par le champ PV de surface 1m^2 ($\text{kWh/m}^2/\text{jour}$).
- PR : le ratio de performance de l'installation PV.

A partir de l'équation précédente (II.26), la puissance crête est :

$$P_c = E_{Elec} \times P_i / E_i \times P_R \quad (II.26)$$

Pour assurer le bon fonctionnement des différents appareils électriques alimentés par un champ PV, une règle importante doit être prise en considération, qui indique que l'énergie électrique journalière produite par le champ PV (E_{Elec}) doit être supérieure ou égale à l'énergie électrique consommée par ces appareils (E_{Besoin}).

Soit : $E_{Elec} \geq E_{Besoin} \quad (II.27)$

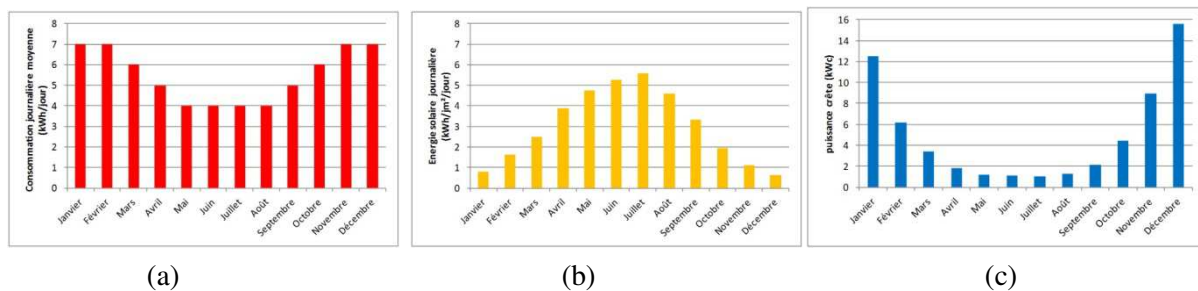
Dans ce cas la puissance crête doit être :

$$P_c \geq E_{Besoin} \times P_i / E_i \times P_R \quad (II.28)$$

II.7.2 Application de la formule de calcul de la puissance crête

Comme indiqué précédemment, le calcul de la puissance crête dépend de l'énergie journalière nécessaire, de l'irradiation solaire, de la puissance radiative et du ratio de performance. Cependant il est difficile de trouver une valeur bien déterminée puisque l'irradiation et la puissance radiative diffèrent d'une heure à une autre pendant la journée et de mois à un autre.

Comme exemple, considérons un site à Reims présentant une consommation journalière standard, une irradiation solaire journalière et la puissance crête définies comme ci-dessous :



**Figure II.13 : a- L'énergie journalière consommée E_{Besoin}
 b- L'irradiation solaire journalière E_i
 c- Puissance crête nécessaire au bon fonctionnement de l'installation**

II.8 Dimensionnement du parc de batteries [3]

Le choix des batteries dans le système photovoltaïque se fait selon les deux critères les plus importants : la tension et la capacité de la batterie.

II.8.1 Choix de la tension du parc de batteries

La première contrainte du choix des batteries est la chute de tension des câbles reliant ces dernières à l'onduleur, ce qui nécessite sa diminution.

La chute de tension (\mathcal{E}) est donnée par l'équation suivante :

$$\mathcal{E} = \frac{\rho * L * I}{S * U_{Bat}} \quad (\text{II.29})$$

Avec :

ρ : La résistivité du matériau conducteur ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$) ;

L : Longueur des câbles (m) ;

I : L'intensité électrique (A) ;

S : La section des câbles (mm^2) ;

U_{Bat} : La tension des batteries .

Pour diminuer ces chutes de tension, trois paramètres doivent être bien choisis :

- La longueur des câbles qui doit être minimisée, c'est-à-dire placer les batteries près de l'onduleur.
- La section des câbles qui doit être augmentée.
- Choisir une tension de batterie élevée.

II.8.2 Choix de la capacité du parc de batteries

La capacité du parc de batterie doit être capable de couvrir l'ensemble des besoins électriques

(E_{Besoin}) :

- Sur la durée de l'autonomie de réserve (N_j) ;
- Sans aucun apport d'énergie solaire ;
- Sans jamais dépasser la profondeur maximale de décharge (P_D) ;
- Et dans les conditions de température du site (K_T).

La formule de calcul de la capacité de la batterie est donnée par :

$$C_{Td} = \frac{N_j}{P_D} \times \frac{E_{\text{Besoin}}}{K_T} \quad (\text{II.30})$$

Avec :

C_{Td} : capacité de la batterie associée à la durée de décharge T_d

N_j : autonomie de réserve (jours)

E_{Besoin} : énergie journalière consommée (Ah/jour)

P_D : profondeur maximale de décharge

K_T : coefficient de température de la capacité

T_d : durée de décharge exprimé en heure. $T_d = N_j * 24$ (II.31)

II.9 Choix du régulateur [7]

Le régulateur solaire, appelé aussi régulateur de charge, a pour rôle de :

- Il limite la charge quand la batterie est complètement chargée ;
- Il ralentit la décharge afin d'éviter les décharges profondes ;
- Il indique en permanence l'état de fonctionnement du panneau solaire et l'état de charge de la batterie solaire.

Les deux éléments principaux pour choisir un régulateur de charge sont :

- **La tension entre les panneaux et les batteries** : le régulateur doit pouvoir accepter cette tension (en général 12V, 24V ou 48V).

- **L'intensité maximale du régulateur** : l'intensité du régulateur (en ampères, A) doit être supérieure à l'intensité de court circuit des panneaux solaire auquel il est connecté. Une marge de sécurité de 10% à 20% n'est pas inutile.

Les régulateurs solaires MPPT permettent de tirer de meilleures performances des panneaux solaires.

II.10 Choix de l'onduleur [8]

Un onduleur pour un site autonome a pour rôle de convertir la tension continue délivrée par le parc de batteries en une tension alternative pour couvrir les besoins de la charge électrique.

Les critères importants pour choisir l'onduleur sont :

- **Profil de charge** : l'onduleur doit assurer la puissance journalière des besoins des appareils.

- **Puissance nominale** : l'onduleur doit avoir une puissance nominale supérieure à celle de la charge, avec une marge de 30%.

- **Rendement de l'onduleur** : comme indiqué précédemment, le rendement de l'onduleur doit être de 95%.

- **Consommation en veille** : l'onduleur doit avoir un système de mise en veille ou bien avoir une consommation à vide pratiquement nulle.

- **Stabilité en tension et en fréquence** : l'onduleur doit délivrer une tension secteur de (220V AC) plus au moins approchée.

- Protection : l'onduleur doit être muni d'une protection contre les surcharges et les courts circuits ainsi contre les températures élevées.

II.11 Dimensionnement des câbles

Le choix des câbles reliant les différents composants du système photovoltaïque se base sur les deux caractéristiques :

II.11.1 Courant admissible des câbles

Le courant admissible d'un câble est la valeur maximale de l'intensité du courant qui le traverse sans que sa température ne dépasse les normes.

II.11.2 Chute de tension

Comme indiqué précédemment, la chute de tension des câbles augmente avec l'inverse de sa section, donc pour diminuer ces chutes il est important de choisir une section des câbles suffisamment importante.

II.11.3 Conditions de fonctionnement des câbles photovoltaïques

Afin d'obtenir le meilleur rendement de l'installation, le choix des câbles reliant les modules PV et le régulateur ainsi que les batteries est très important, pour cela des conditions de fonctionnement sont à respecter :

- Choisir une longueur la plus courte possible entre les composants de l'installation.
- Choisir une section suffisamment grande pour diminuer les chutes de tension.
- Choisir un câble résistant aux changements climatiques qui provoquent une élévation et une baisse de la température.

II.12 Conclusion

Le dimensionnement d'une installation photovoltaïque autonome est une étude très importante et bien précise. Dans le but d'avoir une installation fiable et satisfaisante il faut choisir des composants qui satisfaites trois qualités :

- La meilleure technologie.
- Un bon rendement.
- Un coût réduit.

Plusieurs logiciels de dimensionnement des installations PV sont en voie de développement. Le chapitre III est une étude détaillée, avec le logiciel PVsyst, du dimensionnement d'une installation photovoltaïque autonome.

III.1 Introduction

Après l'étude des différents paramètres d'une installation PV autonome, une application de cette dernière nécessite des logiciels de dimensionnement photovoltaïque spéciaux. Dans notre étude on a choisis le logiciel PVsyst pour dimensionner et simuler une installation PV autonome d'une demeure située à Tizi ouzou.

III.2 Site d'implantation

Pour la simulation de notre projet de système photovoltaïque autonome, nous avons choisi le site de Tizi Ouzou où les données géographiques et météorologiques sont incluses dans le logiciel PVSYST.

III.2.1 Situation géographique de Tizi Ouzou

Tizi Ouzou est une ville algérienne située à 100 km à l'est de la capitale Alger, à 125 km à l'ouest de Bejaïa et à 30 km au sud des côtes méditerranéennes. Les coordonnées géographiques du site de collecte de données sont les suivantes :

Latitude : 36°42'42" Nord

Longitude : 4°02'45" Est

L'altitude par rapport au niveau de la mer : 206 m

III.2.2 Climat de Tizi Ouzou

Tizi Ouzou bénéficie d'un climat tempéré chaud. A Tizi Ouzou, les précipitations sont plus importantes en hiver qu'en été. Selon la classification de Köppen-Geiger, le climat est de type Csa. Tizi Ouzou affiche une température annuelle moyenne de 17.9 °C. La moyenne des précipitations annuelles atteints 896 mm [9]

III.3 Présentation du logiciel PVsyst



Figure III.1 : Présentation de PVsyst

PVsyst est un logiciel de pré dimensionnement, conçu pour être utilisé dans le domaine du photovoltaïque pour la conception et le dimensionnement du système. Il propose plusieurs manières de modéliser un système PV (système autonome ou accorder au réseau) ; comme il propose plusieurs technologies des cellules PV et des batteries ainsi que les différents fabricant de ces derniers. Pour notre étude on a choisit un système isolé avec batteries.

La simulation d'un système sous PVsyst nécessite plusieurs étapes qui se succèdent l'une après l'autre.

III.4 les étapes de la simulation d'un système PV autonome sous PVsyst

III.4.1 Désignation du projet

Le projet inclut principalement la définition du site géographique et le fichier météo horaire. Par ailleurs, on peut construire plusieurs variantes du système à étudier

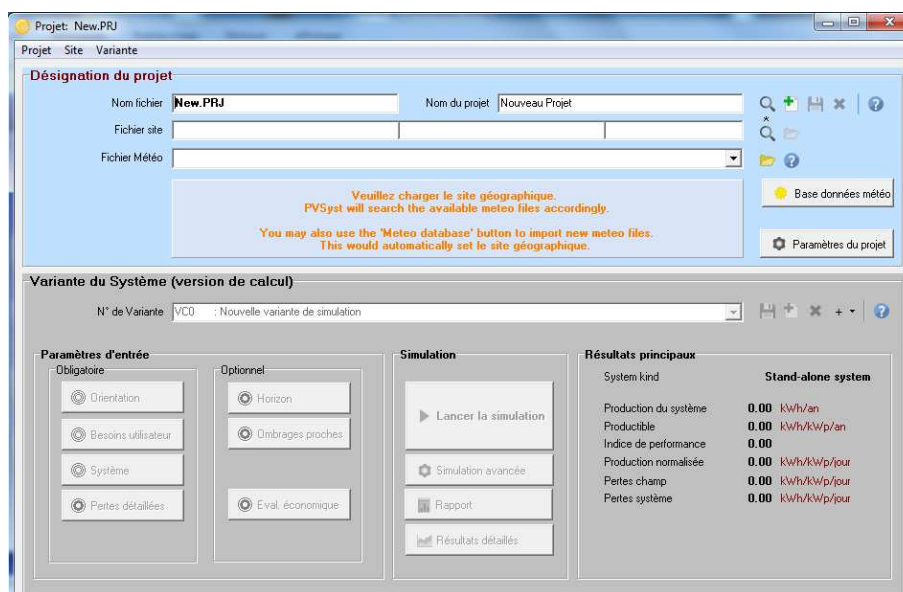


Figure III.2 : Désignation du projet dans PVsyst

III.4.2 Les paramètres du site

Dès le lancement de la simulation du système étudié, la fenêtre indiquée sur la Figure III.3 s'affiche. Ainsi, l'utilisateur introduit les coordonnées géographiques relatives au site concerné, ce qui permet d'avoir toutes les informations nécessaires du gisement solaire.

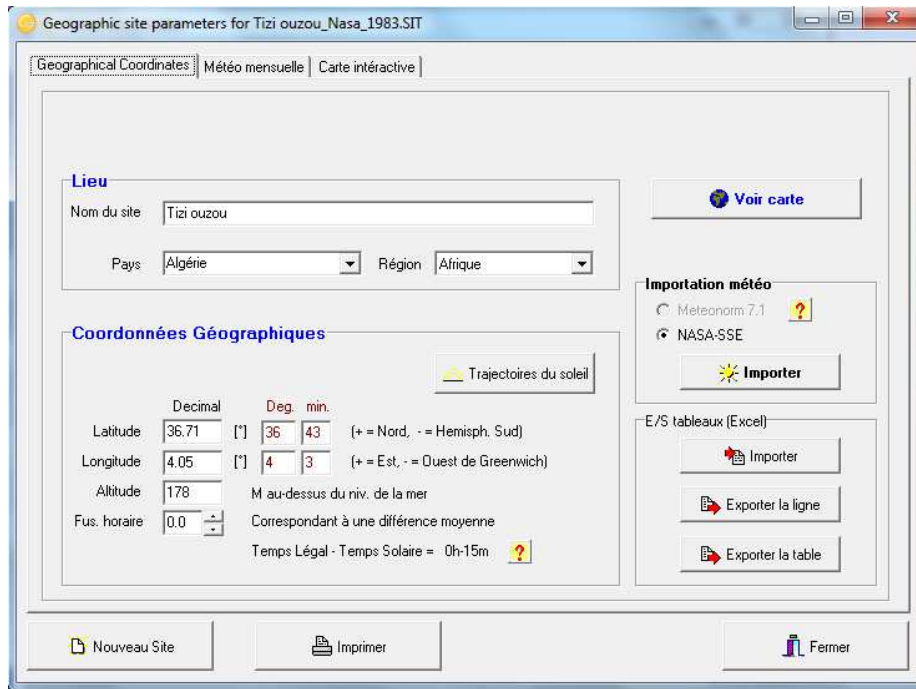


Figure III.3 : Coordonnées géographiques du site de Tizi-ouzou

La figure III.4 ci-dessous nous donne les moyennes mensuelles des irradiations globales et diffuses ainsi que celles des températures.

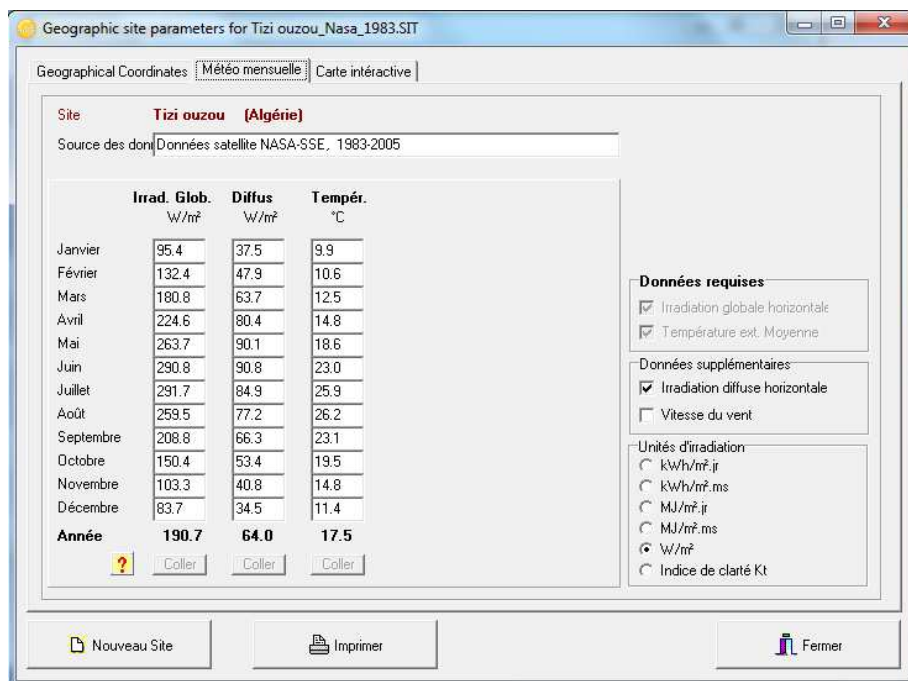


Figure III.4 : Données Météorologiques mensuelles de Tizi-ouzou

Par ailleurs, la Figure III.5 nous montre la trajectoire du soleil à chaque heure de la journée pendant les mois de l'année selon les deux coordonnées : l'azimut (angle avec la direction du sud, compté négativement vers l'Est) et la hauteur du soleil (angle entre le soleil et le plan horizontal du lieu).

Exemple : si on désire lire la position du soleil le 20 juin à 9h, il suffit de trouver l'intersection de la ligne 2 et 9h, le résultat est : -75° (75° ouest) et 45° (la hauteur est 45°).

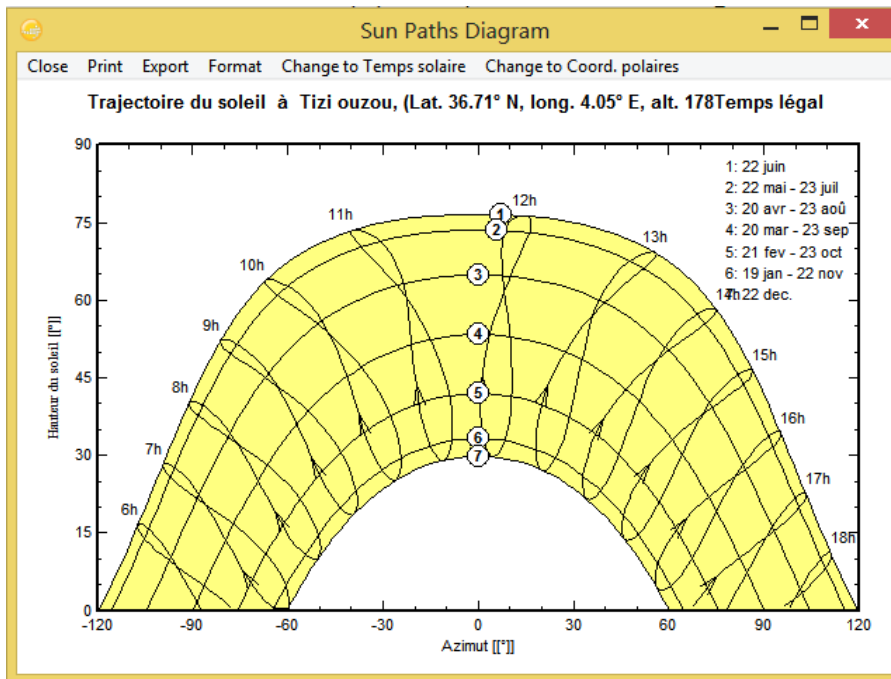


Figure III.5 : Diagramme de la trajectoire du soleil

III.4.3 Orientation des panneaux

Selon les informations citées au paragraphe III.2.2 ci-dessus encouragent l'utilisation de l'énergie solaire sur le site de Tizi Ouzou. Cependant, afin de pouvoir estimer les angles optimaux d'inclinaison des modules photovoltaïques dans cette région pour lesquelles le gain énergétique est amélioré, nous avons opté pour une inclinaison de 36° .

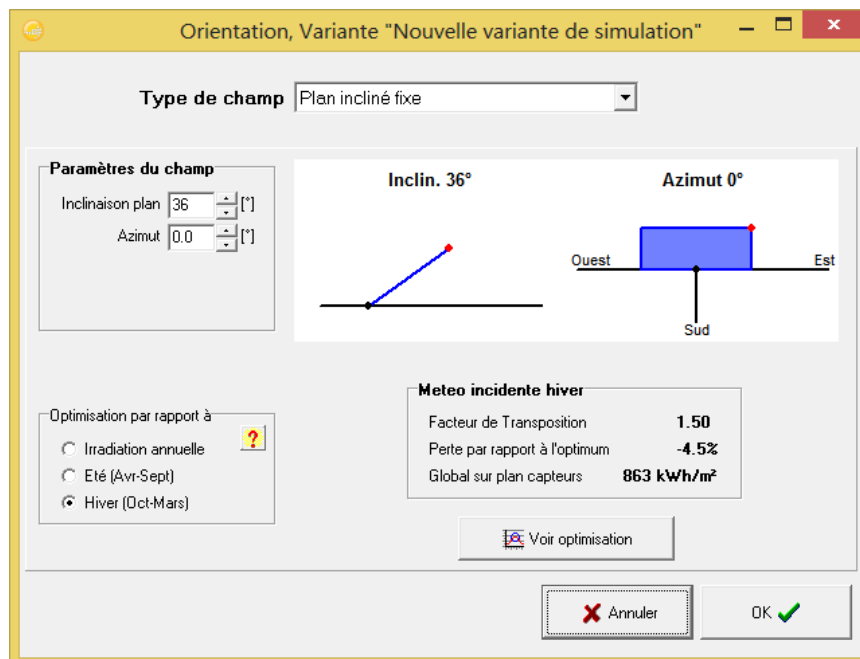


Figure III.6 : Orientation des panneaux

III.4.4 Détermination des besoins électriques

En mode « autonome », Pvsys dispose d'une fenêtre où nous choisirons la consommation estimée.

Comme détaillé dans le chapitre II, les appareils d'une habitation diffèrent selon le type, la consommation électrique et le temps d'utilisation. PVsyst donne l'estimation de la consommation journalière et mensuelle moyenne. Dans le cadre de notre étude et selon la figure III.7, les résultats obtenus sont comme suit :

- la consommation électrique journalière : 4257 Wh/jours
- la consommation électrique mensuelle : 127.7 kWh/mois

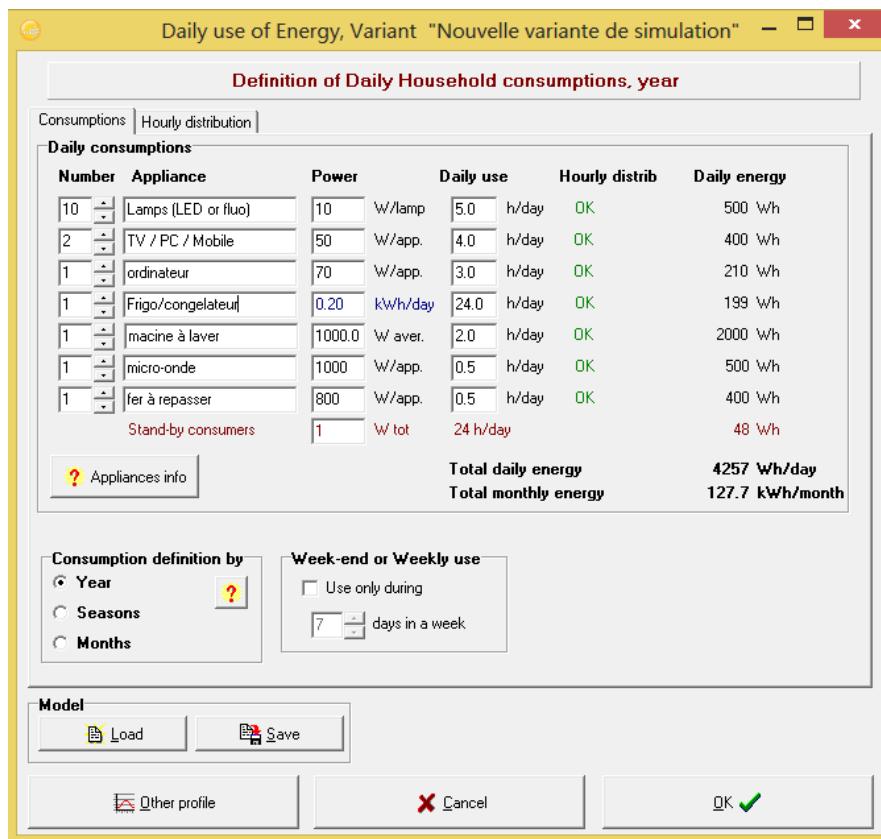


Figure III.7 : Calcul des besoins électriques

III.4.5 Dimensionnement du champ PV

Plusieurs technologies existantes pour les modules PV ; pour cela le dimensionnement du module est basé selon plusieurs critères comme les besoins électriques de l'installation et le choix d'une technologie qui réduit au maximum le nombre de batteries sans avoir un manque d'énergie. Ainsi, comme c'est indiqué sur la figure III.8 le type de module choisi dans le cas de cette présente étude est de type : LG730 N2T-A5 dont les caractéristiques techniques sont données en (Annexe A).

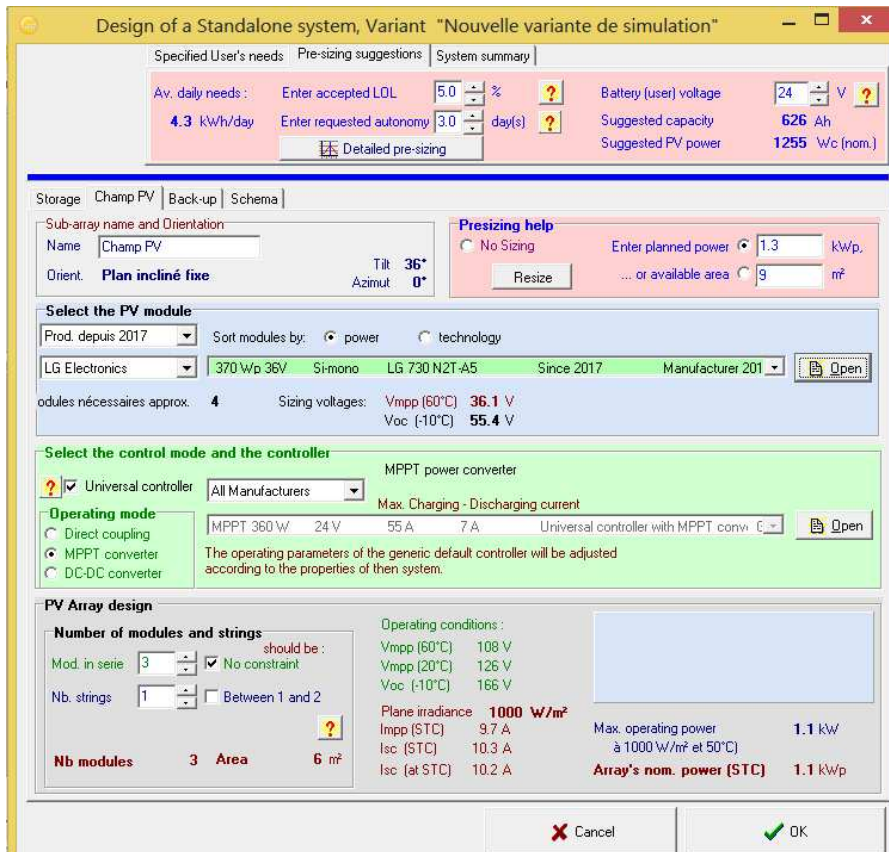


Figure III.8 : Dimensionnement du champ PV

La figure suivante représente les caractéristiques du panneau choisi.

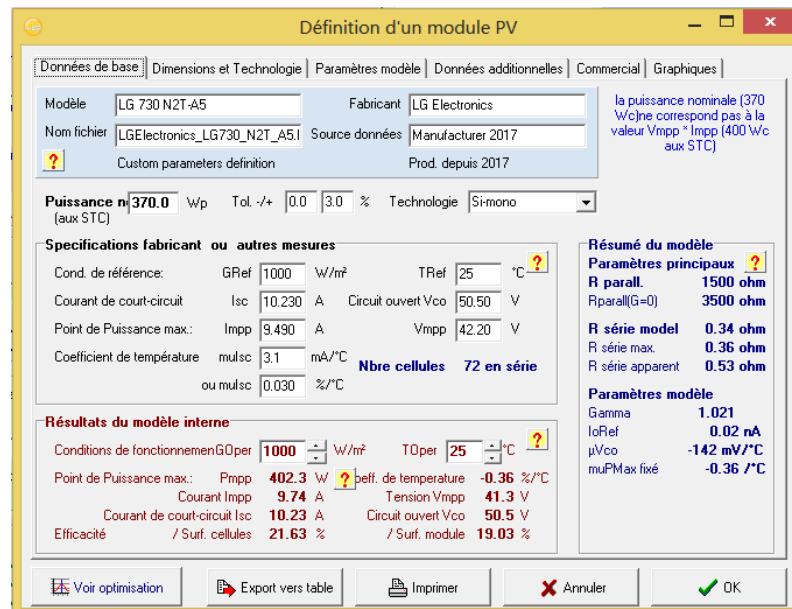


Figure III.9 : Les caractéristiques du panneau.

III.4.6 Le choix du régulateur

Le régulateur le plus utilisé dans la technologie du photovoltaïque est le MPPT. La figure III.10 montre les caractéristiques électriques du régulateur MPPT (Annexe B).

Figure III.10 : Caractéristiques du régulateur MPPT

III.4.7 Dimensionnement du parc de batteries

On a choisis des batteries acide au plomb gel (Annexe C) pour le stockage d'énergie ; Ainsi, selon la figure III.11, pour une tension DC de 24 V et une durée d'autonomie de trois jours le nombre de batteries nécessaires pour un tel système photovoltaïque est de douze batteries (2 en séries de 6 chaines). La capacité totale du parc de batteries est de 1500 Ah, pour assurer une énergie électrique suffisante pendant les journées peu ou non ensoleillées.

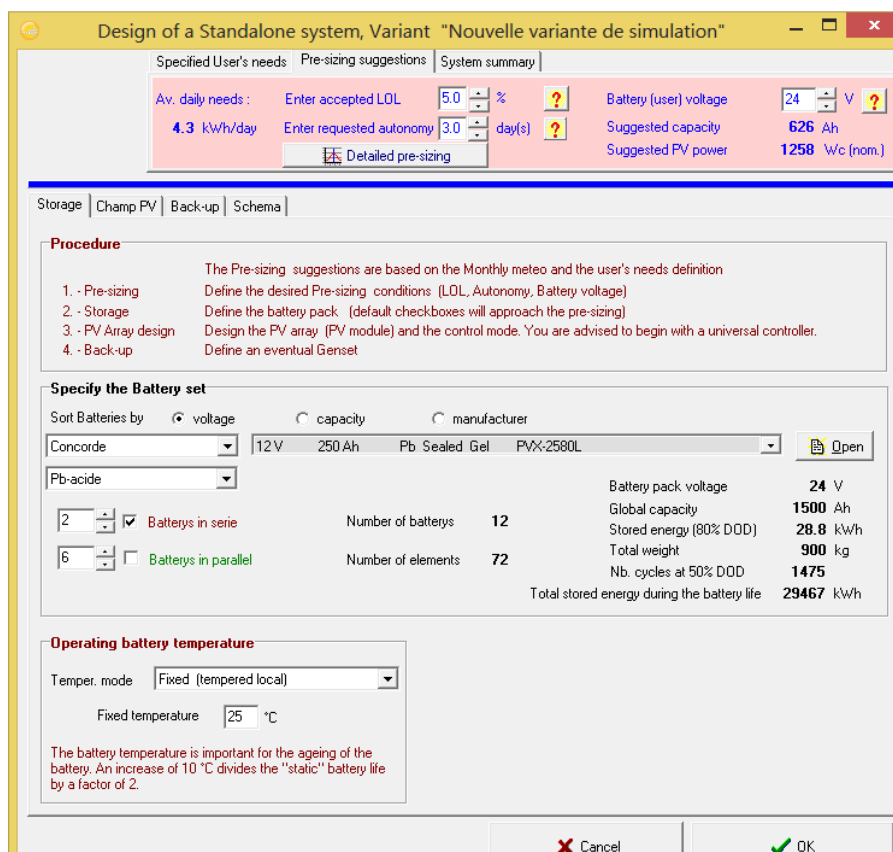


Figure III.11 : Dimensionnement du parc de batteries

Les caractéristiques électriques des batteries utilisées sont données dans la figure suivante.

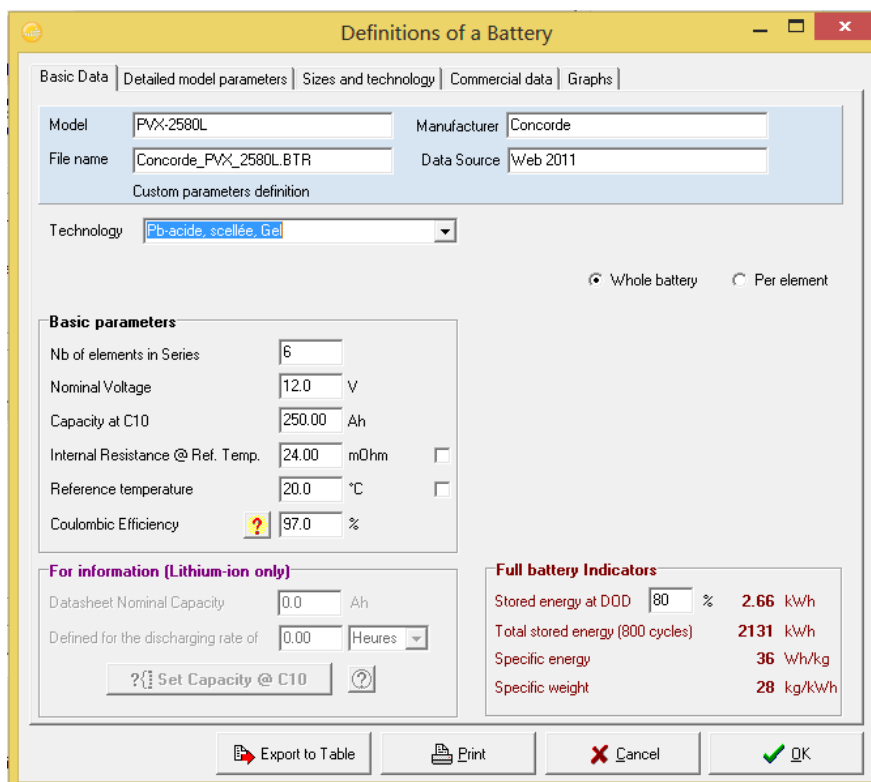


Figure III.12 : Les caractéristiques de la batterie

III.4.8 Le choix de l'onduleur

Le choix de l'onduleur (Annexe D) n'est pas configuré sur PVsyst, pour cela on a opté pour un onduleur choisis par rapport à trois critères :

- La tension d'entrée de l'onduleur doit être la même tension de sortie du régulateur, qui est 24V.
- Sa puissance doit être supérieure égale ou à la puissance maximale journalière du besoin plus 30% de cette dernière.

Soit : $1,2 \text{ kW} + 30\% = 1,56 \text{ kW}$

- Le rendement est de 95%.

L'onduleur choisi est : **CONVERTISSEUR 230V WKS 3 KVA 24V GS**

Les caractéristiques techniques :

Voltage	12V, 24V, 48V
La puissance	3000VA
Puissance onduleur	3000VA

Tableau III. 1 : caractéristique technique de l'onduleur

Plus de précision de caractéristiques de l'onduleur choisi sont mentionnées dans l'annexe B.

III.5 Etude Economique

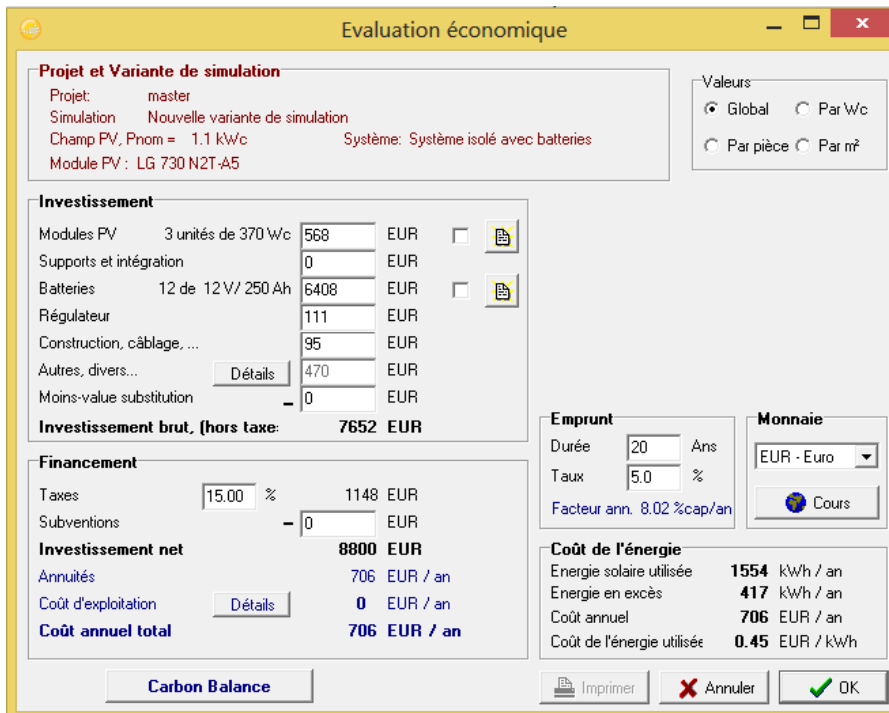


Figure III.13: Etude économique

L'étude économique consiste à estimer le coût total de l'installation photovoltaïque autonome. Pour cela une évaluation économique est configurée sur PVsyst ; en introduisant le coût de chaque composant utilisé pour le système étudié un calcul automatique s'affiche, montré sur la figure III.13.

III.6 Configuration du système photovoltaïque étudié

- Les panneaux photovoltaïques qui produisent un courant électrique continu.
- Le régulateur contrôle la charge et la décharge de la batterie afin d'assurer sa protection.
- L'onduleur transforme le courant continu en courant alternatif pour alimenter les charges AC.
- Les batteries assure l'approvisionnement ininterrompu de la charge la nuit et durant les jours non ensoleillés.

III.7 Conclusion

L'utilisation du logiciel PVsyst nous a permis d'étudier pratiquement tous les éléments de l'installation photovoltaïque autonome, en précisant les caractéristiques électriques de chaque composant ainsi que le coût de ces derniers.

Le résultat de la simulation est présenté sous un fichier PDF automatique. Le chapitre VI sera consacré pour l'interprétation de ces résultats.

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de la simulation d'une installation photovoltaïque autonome avec le logiciel PVsyst qui est conçu pour ce type d'étude.

IV.2 Le rapport de la simulation

Après la configuration de toutes les étapes de la simulation ; un rapport de cette dernière est réalisé automatiquement avec tous les résultats nécessaires sous forme de tableaux et de figures.

La Figure IV.1 montre la variation de la température et du rayonnement solaire sur le site de tizi Ouzou.

Chaque paramètre a une signification et une importance dans notre étude.

- La température de l'air, a une influence sur le rendement de la production des panneaux photovoltaïque, (la température est inversement proportionnelle au rendement des panneaux photovoltaïques).
- L'irradiation solaire mensuelle, nous aidons à déterminer la production énergétique des panneaux photovoltaïques pour chaque mois (les rayonnements solaire sont proportionnelle au rendement des panneaux photovoltaïques).

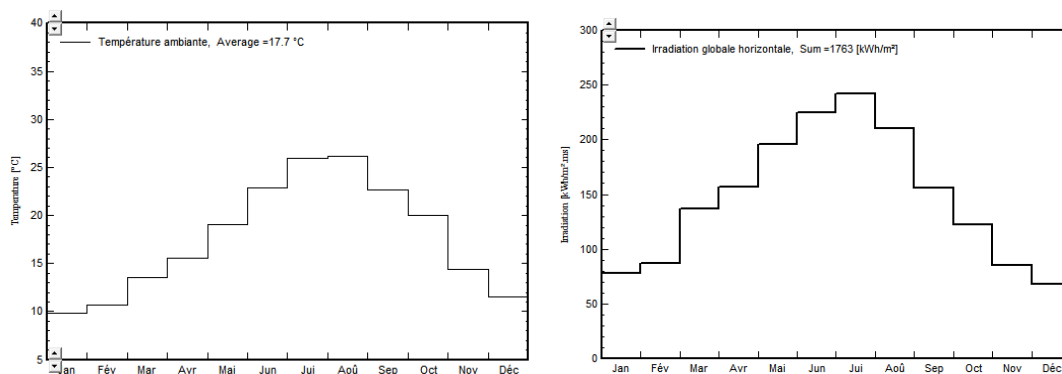


Figure IV.1 : Variation de la température et du rayonnement solaire mensuelle sur le site de TiziOuzou

La figure IV.2 Ci dessous nous donne des informations suivantes :

- **Champ PV** : Constitué de trois modules en série en une seule chaine (trois modules en tous), avec une surface de 6.3 m^2 et de puissance de 1098 Wc à 50°C (dans les conditions de fonctionnement).
- **Facteur de pertes** : Une liste des différentes pertes du système, qui sera encore détaillée sur la figure si après.
- **Batteries** : Un parc de batteries composé de deux batteries en séries en six chaines, avec une tension de 24V et de capacité nominale de 1500 Ah .

- **Le régulateur** : C'est un régulateur MPPT avec une efficacité maximale de 97%.
- **Les besoins de l'utilisateur** : La consommation journalière des appareils électriques de la demeure est en moyenne de 4.3 KWh/jour.

PVSYST V6.75		21/09/18	Page 1/6
Système isolé avec batteries: Paramètres de simulation			
Projet :	master		
Site géographique	Tizi ouzou	Pays	Algeria
Situation	Latitude 36.71° N	Longitude	4.05° E
Temps défini comme	Temps légal Fus. horaire TU	Altitude	178 m
	Albédo 0.20		
Données météo:	tizi ouzou	Meteonorm 7.2 (1991-2000), Sat=100% - Synthétique	
Variante de simulation : Nouvelle variante de simulation			
	Date de la simulation	21/09/18 à 12h28	
Paramètres de simulation	Type de système	Stand-alone system	
Orientation plan capteurs	Inclinaison	36°	Azimut 0°
Modèles utilisés	Transposition	Perez	Diffus Perez, Meteonorm
Caractéristiques du champ de capteurs			
Module PV	Si-mono	Modèle	LG 730 N2T-A5
Custom parameters definition		Fabricant	LG Electronics
Nombre de modules PV		En série	3 modules
Nombre total de modules PV		Nbre modules	3
Puissance globale du champ		Nominale (STC)	1110 Wc
Caractéristiques de fonct. du champ (50°C)		U mpp	113 V
Surface totale		Surface modules	6.3 m²
		En parallèle	1 chaînes
		Puissance unitaire	370 Wc
		Aux cond. de fonct.	1098 Wc (50°C)
		I mpp	9.7 A
		Surface cellule	5.6 m ²
Facteurs de perte du champ PV			
Fact. de pertes thermiques	Uc (const)	29.0 W/m ² K	Uv (vent) 0.0 W/m ² K / m/s
Perte ohmique de câblage	Rés. globale champ	191 mOhm	Frac. pertes 1.5 % aux STC
Perte diode série	Chute de tension	0.7 V	Frac. pertes 0.6 % aux STC
Perte de qualité module			Frac. pertes -0.8 %
Perte de "mismatch" modules			Frac. pertes 1.0 % au MPP
Perte de "mismatch" strings			Frac. pertes 0.10 %
Effet d'incidence (IAM): Fresnel AR coating, n(glass)=1.526, n(AR)=1.290			
	0°	30°	50°
	1.000	0.999	0.987
	60°	70°	80°
	0.962	0.892	0.816
	85°	90°	
	0.681	0.440	0.000
Paramètres du système	Type de système	Système isolé avec batteries	
Batterie	Modèle	PVX-2580L	
	Fabricant	Concorde	
Caractéristiques du banc de batteries	Tension	24 V	Capacité nominale 1500 Ah
	Nombre d'unités	2 en série x 6 en parallèle	
	Température	Fixée (25°C)	
Régulateur	Modèle	Universal controller with MPPT converter	
	Technologie	MPPT converter	Coeff. de temp. -5.0 mV/°C/elem.
Convertisseur	Efficacité maxi et EURO	97.0 / 95.0 %	
Seuils de régulation batterie	Seuils de commande selon	SOC calculation	
	Charge	SOC = 0.90 / 0.75	i.e. approx. 26.4 / 25.1 V
	Décharge	SOC = 0.20 / 0.45	i.e. approx. 23.6 / 24.4 V
Besoins de l'utilisateur :	Consomm. domestique moyenne	Constants sur l'année 4.3 kWh/Jour	

PVsynt Evaluation mode

Figure IV.2: Rapport sur les paramètres de la simulation

La consommation de chaque appareil électrique de la maison, l'énergie totale journalière de l'installation est de 4.3 kWh avec un pic journalier de 1200W ainsi que d'autres informations relatives au système étudié sont détaillés dans le tableau de la figure IV.3.

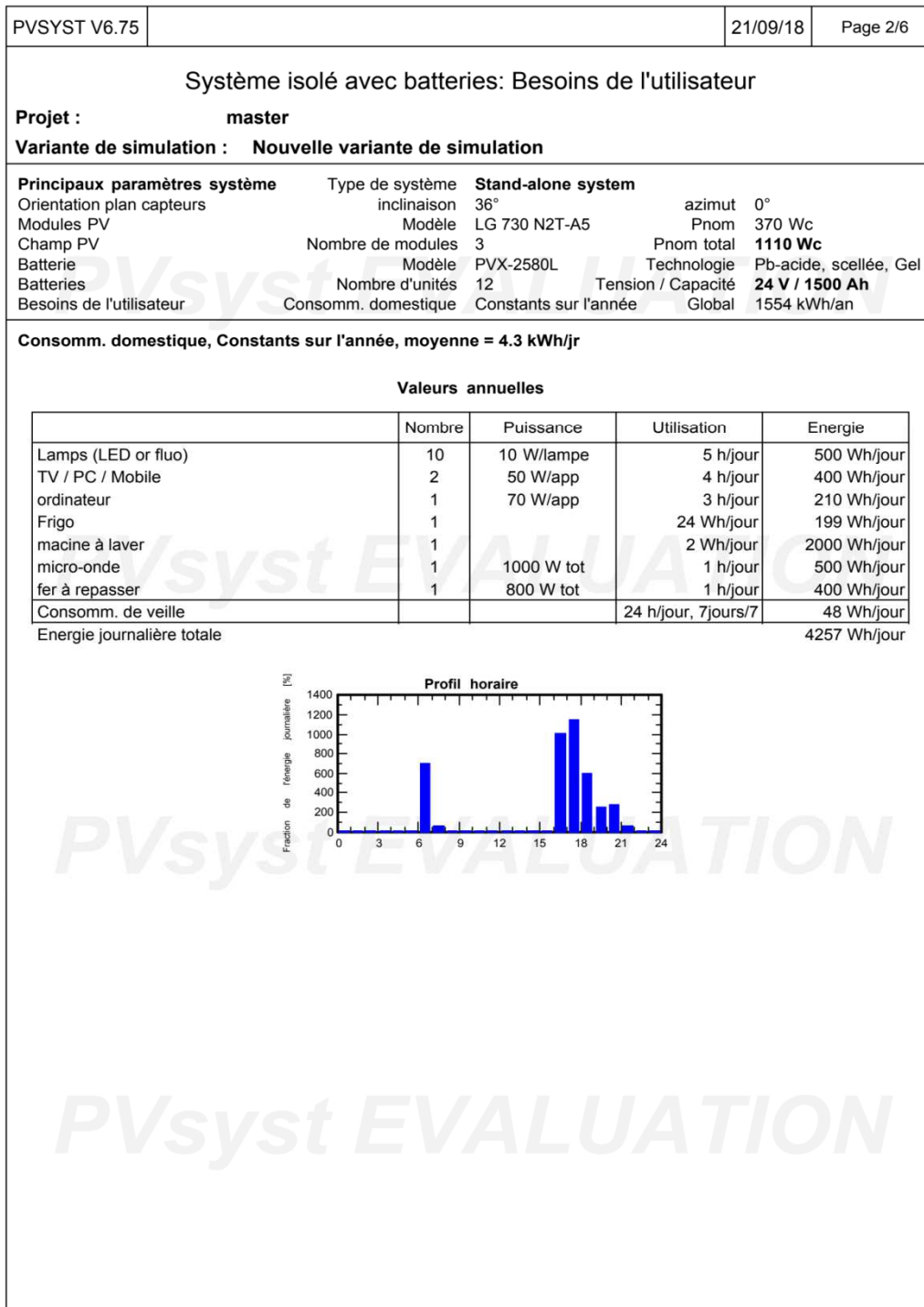
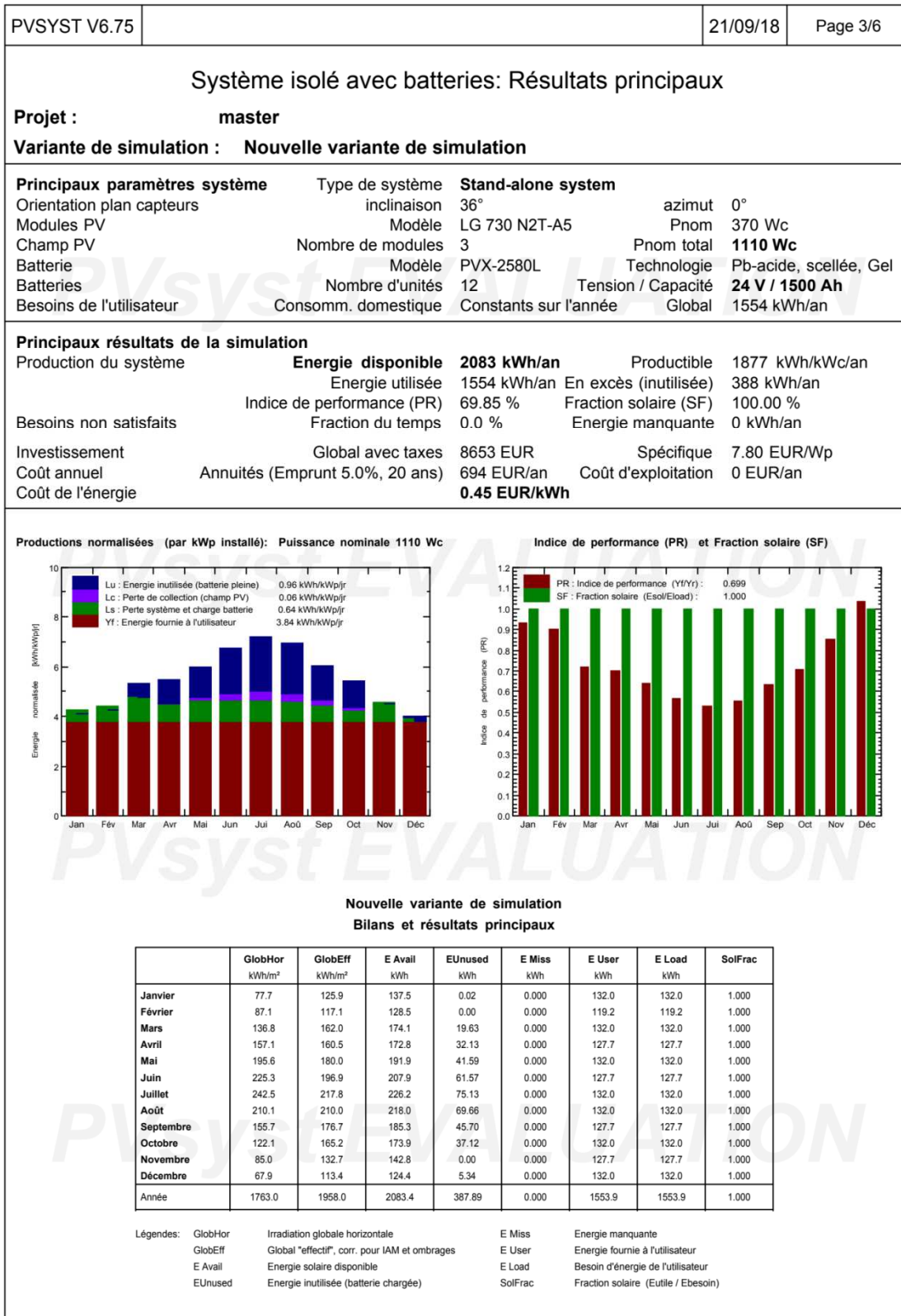


Figure IV.3: Rapport sur les besoins énergétiques de l'utilisateur

D'après les résultats du tableau de la figure IV.4 on voit bien que l'énergie produite par le panneau photovoltaïque est proportionnelle à l'énergie incidente, et que le besoin énergétique de la demeure est satisfait pendant toute l'année.

- L'énergie produite par du champ PV est estimée à 1877 kWh /kWc/an.
- L'énergie totale du besoin est 1554 kWh/an.
- L'excès d'énergie est estimé à 388 kWh/an.



PVsyst Evaluation mode

Figure IV.4: Rapport des résultats principaux

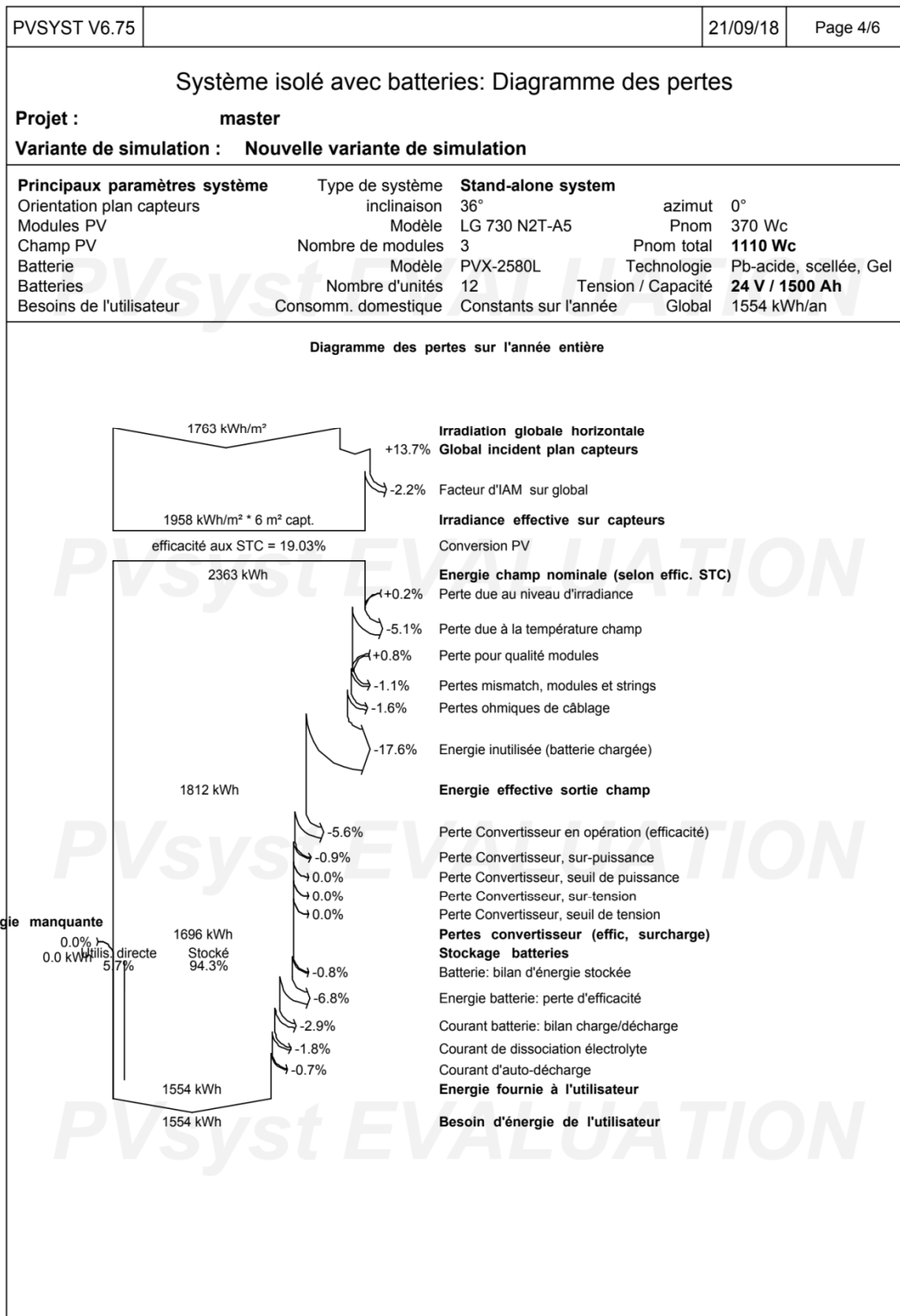
Comme nous l'avons indiqué ci-dessus le lancement de la simulation nous permet d'accéder aux différents résultats de la conception de notre système photovoltaïque d'une puissance de 1098 Wc à 50°C.

Ainsi, à partir de la figure IV.5, nous constatons les différentes pertes d'énergies, résumées sous forme d'un diagramme, sont très importantes dans le système photovoltaïque.

Ceci est justifié par le fait que le système photovoltaïque est exposé à plusieurs paramètres de dégradation qui est interprété par des facteurs de pertes (voir figure IV.5) :

- Pertes champs (Température, qualité des modules, résistance,... etc).
- Pertes Onduleur globales.
- Pertes système de stockage
- Le besoin d'utilisation : charge avec système de stockage

Nous remarquons sur le diagramme des pertes sur l'année entière que l'irradiation globale incidente n'est pas complètement exploitable à cause des facteurs et pertes sur les différentes parties du système, on obtient une énergie totale de 1554 kWh.



PVsyst Evaluation mode

Figure IV.5: Diagramme des pertes

La figure ci dessous représente l'influence de chaque type de perte électrique sur le graphe représentant les caractéristiques courant-tension de la cellule PV. Nous constatons que le facteur le plus influençant sur la production d'énergie d'un champ photovoltaïque est la température.

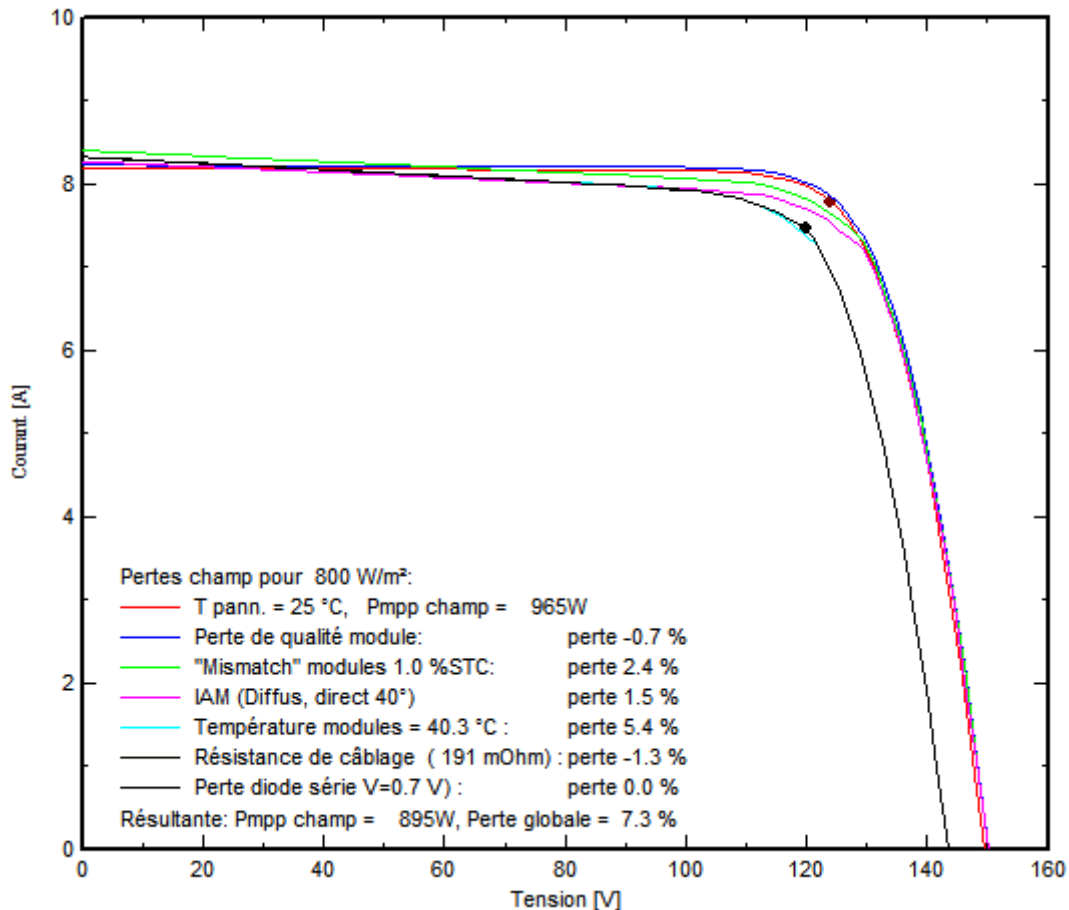


Figure IV.6: Effet des différentes pertes sur la caractéristique I(V)

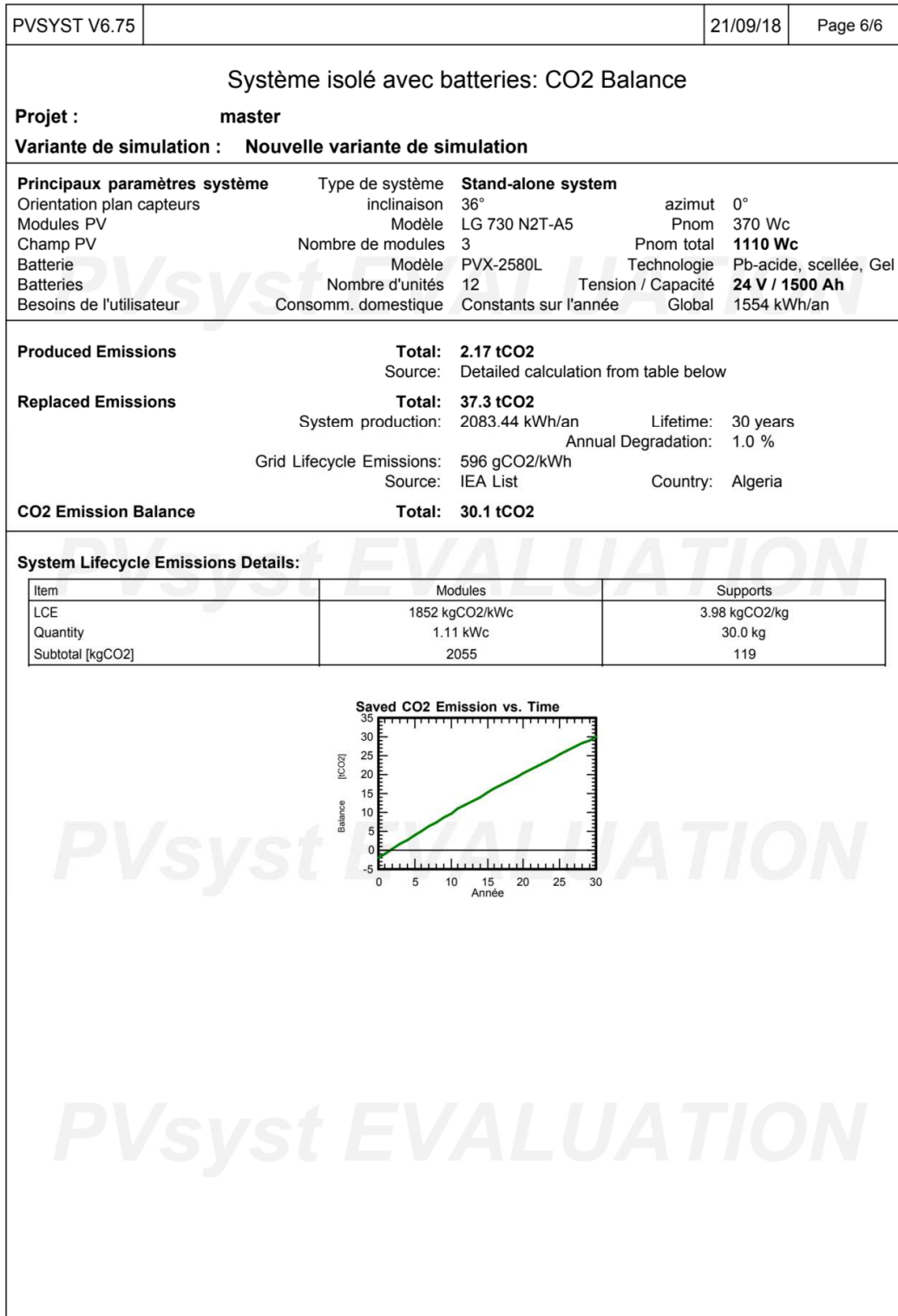
La figure IV.7 représente l'estimation totale et détaillée du coût des éléments de l'installation, qui est approximativement de 8804€, sans compter la main d'œuvre de l'installation ainsi que le coût des batteries qu'il faut changer tous les cinq ans.

PVSYST V6.75		21/09/18	Page 5/6
Système isolé avec batteries: Evaluation économique			
Projet : master			
Variante de simulation : Nouvelle variante de simulation			
Principaux paramètres système	Type de système	Stand-alone system	
Orientation plan capteurs	inclinaison	36°	azimut 0°
Modules PV	Modèle	LG 730 N2T-A5	Pnom 370 Wc
Champ PV	Nombre de modules	3	Pnom total 1110 Wc
Batterie	Modèle	PVX-2580L	Technologie Pb-acide, scellée, Gel
Batteries	Nombre d'unités	12	Tension / Capacité 24 V / 1500 Ah
Besoins de l'utilisateur	Consomm. domestique	Constants sur l'année	Global 1554 kWh/an
Investissement			
Modules PV (Pnom = 370 Wc)	3 unités	189 EUR / unité	568 EUR
Supports et intégration		0 EUR / module	0 EUR
Batteries (12 V / 250 Ah)	12 unités	534 EUR / unité	6408 EUR
régulateur			111 EUR
Construction, câblage, ...			95 EUR
ONDULEUR			343 EUR
Moins-value substitution			0 EUR
Investissement brut (sans taxes)			7525 EUR
Financement			
Investissement brut (sans taxes)			7525 EUR
Taxes sur l'investissement (TVA)	Taux 17.0 %		1279 EUR
Investissement brut (TTC)			8804 EUR
Subventions			0 EUR
Investissement net (TTC)			8804 EUR
Annuités	(Emprunt 5.0 % sur 20 ans)		706 EUR/an
Entretien			0 EUR/an
assurance, taxes annuelles			0 EUR/an
Provision remplacement batteries	(durée de vie 3.5 ans)		0 EUR/an
Coût annuel total			706 EUR/an
Coût de l'énergie			
Energie solaire utilisée			1554 kWh / an
Energie en excès (batterie pleine)			388 kWh / an
Coût de l'énergie utilisée			0.45 EUR / kWh

PVsystem Evaluation mode

Figure IV.7: L'évaluation économique de l'installation

La dernière figure du rapport de simulation sous PVsyst est le bilan carbone, qui a pour objectif de mesurer les émissions des gaz à effet de serre dues à l'installation PV.



PVsyst Evaluation mode

Figure IV.8: Emission du CO2 du système

On peut exprimer le potentiel de réduction des émissions de CO₂ en tCO₂/kWh. Il indique la quantité de CO₂ qu'aurait émis le parc énergétique national pour produire la même quantité d'électricité pendant la durée de vie du système photovoltaïque.

Le système étudié a donné le résultat du taux de réduction d'émission du CO₂ pendant 30 ans est de 30,302 tons. Le calcul de ce résultat est montré sur figure IV.9.

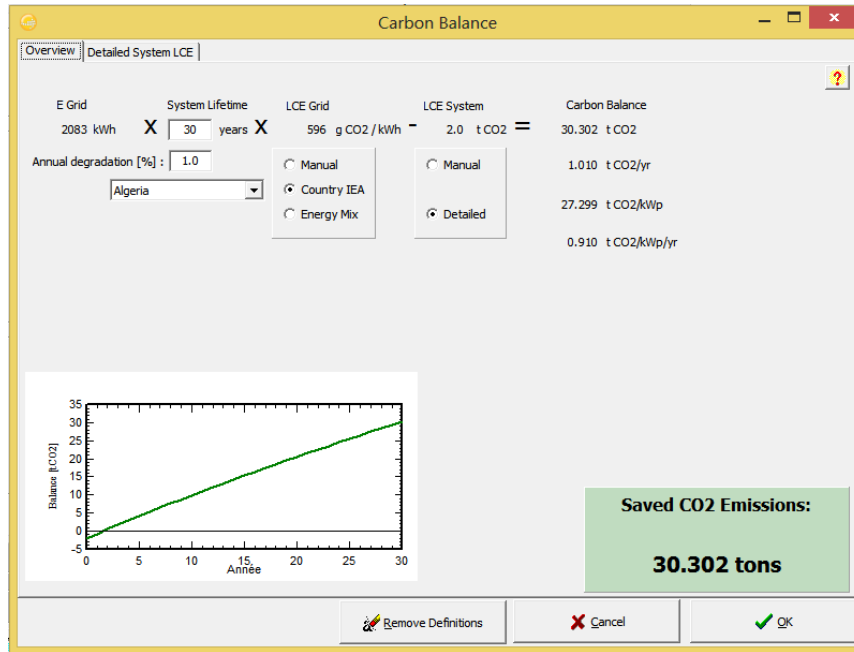


Figure IV.9: Bilan du CO₂ émis

IV.3 Conclusion

A la base des résultats de la simulation du système photovoltaïque autonome avec le logiciel PVsyst, nous pouvons conclure qu'on peut choisir différentes technologies pour satisfaire le besoin électrique d'une maison.

Malgré le coût élevé de l'installation, cette dernière a l'avantage de réduire l'émission de CO₂.

Conclusion générale et perspectives

Le photovoltaïque est cependant une solution d'avenir qui mérite d'être plus exploitée. Cette énergie qui permet une production autonome d'énergie propre sans combustibles fossiles et donc une réduction des gaz à effets de serre ainsi qu'une considérable réduction de la pollution atmosphérique. Ce type de système est simple à installer, sa construction et sa maintenance peut être assurée par un non spécialiste.

Notre étude est basée sur l'installation d'un système photovoltaïque autonome assurant les besoins énergétiques de l'ensemble des appareils électriques d'une maison à moyenne consommation.

On a commencé par l'étude détaillée des composants du système depuis le rayonnement solaire jusqu'à la charge. Puis rassemblé les différentes pertes de chaque composant pour avoir une énergie du besoin suffisante malgré ces pertes en utilisant des composants fiables et convenables à l'installation.

On a ensuite utilisé le logiciel PVsyst pour le dimensionnement de l'installation pour estimer l'énergie solaire capté par le panneau PV installé sur une maison située à Tizi-Ouzou, l'énergie produite par ce dernier, l'énergie du besoin électrique des appareils, l'énergie stockée dans les batteries pour assurer une énergie suffisante pour les journées non ensoleillées.

Les composants ont été choisis d'une manière à avoir suffisamment d'électricité en présence du rayonnement solaire et surtout en son absence. Les résultats de la simulation sous PVsyst auxquels nous avons abouti sont : Un panneau de 6,3 m² qui délivre une énergie estimée à 1877 kWh/an, avec douze batteries de capacités totales de 1500 Ah, qui est supérieure à l'énergie du besoin qui est de 1554 kWh/an. Le surplus de production est de 417 kWh/an. Ce dernier, peut être revendu où bien stocké dans d'autres batteries pour l'exploiter dans d'autres utilisations.

Du point de vue économique, les résultats obtenus révèlent que le coût d'une installation PV autonome est trop élevé qui est estimée de 8804€, sans compter les frais de la main d'œuvre. Mais avec l'évolution de la technologie, le prix des composants photovoltaïques diminue d'année en année.

Du côté environnement, l'étude de l'installation photovoltaïque autonome a révélé que l'émission du CO₂ est très réduite, ce qui est un avantage pour de telles technologies.

Toutes fois, des perspectives demeurent nécessaires au-delà de ce mémoire, dont :

- Affiner le travail en utilisant des modèles plus performants et plus complexes.
- Valider les résultats obtenus par une confrontation aux valeurs réelles mesurées.
- Généraliser l'étude pour d'autres zones climatiques algériennes.

Annexes A

Le PANNEAU SOLAIRE LG 370WC NEON R MONOCRISTALLIN



Dimensions : 1700 x 1016 x 40 mm.

Poids : 18.5 ± 0.5 Kg.

Puissance max : 370W

Le LG NeON® R est le nouveau vecteur hautes performances de la maison LG. La nouvelle structure de cellule innovante sans électrode sur la face avant permet d'exploiter au maximum la lumière et d'améliorer ainsi les performances et la fiabilité. Le LG NeON® R démontre l'intérêt croissant des clients, au-delà même de son taux de rendement. Le LG NeON® R arrive sur le marché avec une puissance allant jusqu'à 370 Wc, une garantie étendue, une longévité accrue, des performances élevées en conditions réelles, ainsi qu'un design extrêmement esthétique.

Caractéristiques essentielles

Garantie de performance améliorée : LG NeON™R est doté d'une garantie de performance améliorée. La dégradation annuelle a baissé de -0,7 %/an à -0,6 %/an. Même après 25 ans, la cellule garantit une puissance délivrée supérieure de 2,4 % par rapport aux précédents modules NeON™.

Une puissance délivrée élevée : En comparaison avec les modèles précédents, le LG NeON™R a été conçu pour améliorer significativement son rendement en puissance délivrée, y compris dans les espaces limités.

Un toit esthétique : LG NeON™R a été conçu en gardant l'esthétique à l'esprit ; il n'y a tout simplement pas de métal, laissant uniquement la couleur noire des cellules. Avec son design moderne, le produit peut augmenter la valeur du bien immobilier.

Fiche technique

Type	Monocristallin / N-type
Puissance maximum (Pmax) (W)	370
Courant de crête maximale (Imp) (A)	10.01
Tension de puissance max (Vmp)	37.0 V
Tension en circuit ouvert (Voc) (V)	42.8
Courant de court circuit (Isc) (A)	10.82
Température de fonctionnement (°C)	-40 à + 90
Protection max par surintensité inverse (A)	20
Tolérance de puissance de sortie (%)	0 ~ +3
Tension maximum de système (Vdc)	1000
Coefficient de température de Pmax (% / °C)	-0,3
Coefficient de température de Voc (% / °C)	-0,240
Coefficient de température de Isc (% / °C)	0.037
Dimensions (mm)	1700 x 1016 x 40
Poids (kg)	18.5
Rendement du module	21,4 %
Cadre	Aluminium anodisé
Epaisseur du cadre	40 mm
Fabrication	Coréene

Annexes B

REGULATEUR SOLAIRE MPPT 30A SRNE



La nouvelle gamme de régulateurs solaires SRNE propose une efficacité optimale de suivi MPPT de 99.9% ainsi qu'une efficacité de charge de 15 à 20% supérieure à un PWM.

Fiche technique

Model	ML2420 ML2430 ML2440
System voltage	12V/24V auto
No-load loss	0.7W to 1.2W
Battery voltage	9 to 35
Max solar input voltage	100V (25°C), 90V (-25°C)
Max power point voltage range	Battery voltage +2V to 75V
Rated charging current	20A 30A 40A
Rated load current	20A
Max capacitive load capacity	10 000uF
Max photovoltaic system input power	260W / 12V400W/12V550W/12V 520W / 24V800W/24V1100W/24V
Conversion efficiency	≤ 98%
MPPT tracking efficiency	> 99%
Temperature compensation factor	-3.0mv/°C / 2V (default)
Operating temperature	-35°C to +45°C
Protection degree	IP32
Weight	1.4 kg2 kg2 kg
Communication method	RS232
Altitude	≤ 3000m

Annexes C

BATTERIE GEL ULTRACELL 12V 250AH



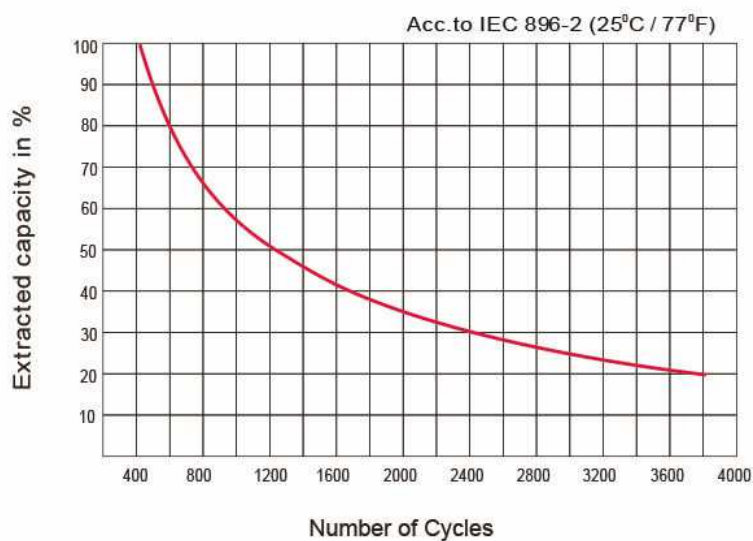
Batterie solaire GEL Ultracell 12V 250Ah.

Cyclage: 1200 cycles à 50% de décharge.

Dimensions (mm) : 520 x 268 x 220.

Poids (Kg) : 73

Cycle de vie par rapport à la profondeur de décharge



Caractéristiques techniques

voltage	12V
Technologie	Gel
Capacité batterie	250Ah
poids	73 K

Annexes D

CONVERTISSEUR 230V WKS 3 KVA 24V GS



Le convertisseur 230V WKS 3kVA - 24V vous permet d'adapter le courant des batteries aux appareils électriques que vous voulez faire fonctionner.

Caractéristiques :

- Puissance : 2400W ou 3000VA
- Convertisseur Pur Sinus (idéal pour les appareils sensibles ou ayant besoin d'un fort courant de démarrage).
- Sans transformateur.
- Protection des batteries avec alarme et déconnexion en cas de batterie basse.
- Autoconsommation très faible .
- Protection contre la surchauffe, les inversions de polarité DC et les court-circuits.
- Isolation entre l'entrée et la sortie afin de sécuriser l'appareil.

Bibliographie

- [1] Melle AMARA Karima « **Contribution à l'étude de conception d'une centrale photovoltaïque de puissance (1MW) interconnectée au réseau de distribution électrique moyenne tension** ». mémoire de magister en Electronique UMMTO.
- [2] Yves Brière, Microtransat 2006.
- [3] www.photovoltaique.guidenr.fr
- [4] CHABANIK « **étude et réalisation d'un régulateur de charge et d'un onduleur monophasé pour un système photovoltaïque autonome** », mémoire de fin de formation, centre de formation professionnelle Ouaguenoun, 2007.
- [5] Mr. BOUTTE Aïssa « **Identification des paramètres internes d'une batterie pour des applications photovoltaïques** », thèse de doctorat en électronique, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2014 – 2015.
- [6] Djohra SAHEB-KOUSSA*, Maiouf BELHAMEL et Khaled BENFERHAT « **Contribution à l'étude théorique du comportement d'un système hybride (éolien-photovoltaïque- diesel) de production d'électricité sans interruption** ». Centre de développement des énergies renouvelables Route de l'observatoire
B.P.62 Bouzaréah, Alger,Algérie.
- [7] MATALLAH Sorya « **Dimensionnement et simulation d'un système photovoltaïque pour alimenter un habitat dans la wilaya d'Ouargla** », Mémoire master académique, Université Kasdi Merbah – Ouargla, 2014/2015.
- [8] K. Kassmi^{1*}, M. Hamdaoui¹ et F. Olivié² « **Conception et modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique** », Université Mohamed Premier Maroc, 2007.
- [9] <https://fr.climate-data.org/location/3061/>

Résumé

L'énergie électrique est devenue une nécessité pour la vie quotidienne, en raison de la hausse de la demande d'énergie, il est nécessaire de trouver d'autres sources de production d'énergie.

Plusieurs énergies renouvelables sont apparues. Dans notre mémoire on s'est basé sur l'énergie solaire, en étudiant le cas d'une installation photovoltaïque autonome pour assurer les besoins électriques d'une maison située à Tizi Ouzou. Pour cela nous avons utilisé le logiciel PVsyst pour le dimensionnement de l'installation.