

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A-MIRA de BEJAIA



FACULTE DE TECHNOLOGIE

Département de Génie Electrique

Mémoire de fin de cycle

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique

Option : Energies Renouvelables

Thème

**Etude, dimensionnement et simulation d'un
système hybride photovoltaïque-diesel alimentant
une habitation isolée**

Présenté par:

-Mr BETTOUCHE Mohamed Amine

-Mr REDJRADJ Adel

Encadré par:

- Mr REMLI Abdelaziz

- Pr AOUZELLAG Djamel

Promotion 2015/2016

Remerciements

Avant tout, nous remercions Dieu, de nous avoir donné la force physique et morale pour accomplir ce travail.

Nous remercions très vivement Mr Dj.Aouzellag, Professeur à l'université de Bejaia, pour avoir dirigé ce travail, pour la confiance et l'intérêt dont il nous a témoigné tout au long de la réalisation de ce travail.

Nous remercions également Mr.Remli, doctorant et encadreur à l'université de Bejaia, pour ses orientations et conseils durant ce travail et la confiance accordé pour mener ce travail à terme, pour sa disponibilité ainsi de nous avoir fait bénéficier de ses compétences scientifiques.

Nous tenons à remercier les membres du jury de nous avoir fait l'honneur d'examiner notre travail.

Enfin, tous ceux et celle qui nous ont aidé et soutenu de près ou de loin à l'élaboration de ce travail trouvant ici l'expression de nos remerciements les plus sincères.

Dédicaces

Je dédie ce travail :

*A mes très chers parents dont le sacrifice,
l'amour et le soutien sont le carburant de
ma réussite.*

A mes frères, et sœurs.

A mes neveux, et nièces.

A tous mes Amis et Amies.

A ma très chère amie (Cina).

REDJRADJ Adel

Dédicaces

Je dédie ce travail :

*A mes très chers parents, grand parents ,
oncles, tantes, neveux et nièce.*

A mes frères (Raouf et Mehdi).

A ma sœur (Linda).

A tous mes Amis et Amies.

BETTOUCHE Mohamed Amine

Sommaire

Introduction générale.....	(01)
 <u>Chapitre I : Energie photovoltaïque, batteries électrochimiques et systèmes hybrides</u>	
I.1 Introduction.....	(03)
I.2 Energie solaire.....	(03)
I.3 Rayonnement Solaire.....	(04)
I.4 Jonction P-N.....	(05)
I.5 Cellule photovoltaïque.....	(05)
I.5.1 Caractéristique courant/tension d'une photopile.....	(06)
I.5.2 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	(06)
I.5.3 Technologies et types de cellules photovoltaïques.....	(07)
I.5.3.1 Caractéristique de silicium.....	(07)
I.5.3.2 Cellule en silicium monocristallin.....	(08)
I.5.3.3 Cellule en silicium polycristallin.....	(08)
I.5.3.4 Cellule en silicium amorphe.....	(09)
I.5.4 Comparaison des différentes technologies.....	(09)
I.6 Modules photovoltaïques.....	(11)
I.6.1 Des cellules photovoltaïques aux modules photovoltaïques.....	(11)
I.6.2 Courbe caractéristique I-U.....	(12)
I.7 Modèle électrique et mathématique de module photovoltaïque.....	(13)
I.7.1 Modèle à une diode.....	(13)
I.8 Commande MPPT.....	(15)
I.8.1 Méthode de perturbation et d'observation (P&O).....	(15)
I.9 Accumulateurs électrochimiques.....	(17)

I. 9.1	Différents types de batteries.....	(18)
I.9.1.1	Batteries au nickel.....	(18)
I.9.1.1.1	Nickel cadmium (Ni-Cd).....	(19)
I.9.1.1.2	Nickel métal hydrure (Ni-MH).....	(19)
I.9.1.2	Batteries Lithium-ion.....	(19)
I.9.1.3	Batteries acides plomb.....	(20)
I.9.1.3.1	Description.....	(20)
I.9.1.3.2	Caractéristiques électriques.....	(20)
I.9.2	Comparaison des caractéristiques des batteries électrochimiques.....	(21)
I.10	Générateur diesel.....	(22)
I.10.1	Généralités.....	(22)
I.10.2	Avantages et inconvénients du groupe électrogène.....	(22)
I.11	Systèmes hybrides de production d'électricité.....	(23)
I.11.	Configurations des systèmes hybrides PV/Diesel avec stockage d'énergie	(23)
I.11.1.1	Configuration série.....	(24)
I.11.1.2	Configuration PV/Diesel commutée.....	(25)
I.11.1.3	Configuration parallèle.....	(26)
I.12	Intérêt des systèmes hybrides dans les sites isolés.....	(27)
I.13	Conclusion.....	(27)

Chapitre II : Dimensionnement d'un système hybride pour une habitation isolée

II.1	Introduction.....	(28)
II.2	Définition des besoins énergétiques.....	(28)
II.2.1	Inventaire des appareils électriques.....	(28)
II.2.1.1	Eclairage	(28)

II.2.1.2 Appareils courant à faible consommation.....	(30)
II.2.1.3 Equipements courants à forte puissance électrique.....	(31)
II.3- Bilan de puissance et d'énergie journalier (consommation journalière)	(32)
II.3.1 Tableau de la consommation journalière (Hiver).....	(32)
II.3.2 Tableau de la consommation journalière (été).....	(33)
II.4 Dimensionnement du système.....	(34)
II.4.1 Dimensionnement du champ photovoltaïque.....	(34)
II.4.1.1 Evaluation du gisement solaire.....	(34)
II.4.1.1.1 Localisation.....	(34)
II.4.1.1.2 Angle d'inclinaison et orientation des panneaux	(35)
II.4.1.1.3 Gisement solaire mensuelle.....	(36)
II.5 Calcul de la puissance crête du champ PV.....	(38)
II.6 Envisagé le groupe électrogène	(38)
II.7 Choix des modules.....	(40)
II.7.1 Détermination du nombre de module.....	(40)
II.8 Dimensionnement du parc de batteries.....	(42)
II.8.1 Choix de la tension et calcul de la capacité.....	(42)
II.8.2 Utilisation et bon fonctionnement.....	(43)
II.9 Conclusion.....	(43)

Chapitre III : Modélisation du système hybride PV/Diesel

III.1 Introduction.....	(44)
III.2 Schéma global du système.....	(44)
III.3 Modélisation du générateur PV.....	(45)
III.3.1 Caractéristiques de panneau photovoltaïque.....	(45)
III.3.1.1 Influence de l'irradiation.....	(45)

III.3.1.2 Influence de la température.....	(47)
III.3.2 Caractéristiques du champ photovoltaïque.....	(48)
III.3.2.1 Influence de l'irradiation.....	(48)
III.3.2.2 Influence de la température.....	(49)
III.4 Modélisation du hacheur élévateur.....	(50)
III.4.1 Model mathématique.....	(50)
III.4.2 Equation mathématique et conduction en mode continue.....	(51)
III.4.2.1 Equation mathématique.....	(51)
III.4.2.2 Conduction en mode continue.....	(51)
III.4.2.3 Diagramme de Tension et du courant.....	(52)
III.4.3 Commande MPPT du hacheur élévateur.....	(53)
III.4.3.1 Structure de la commande.....	(53)
III.4.3.2 Régulateur PI.....	(53)
III.5 Modélisation de la batterie plomb-acide.....	(54)
III.6 Modélisation de l'onduleur de tension MLI monophasée.....	(55)
III.6.1 Modèle mathématique de l'onduleur monophasé.....	(55)
III.6.2 Commande MLI.....	(57)
III.6.2.1 Principe de la commande « sinus-triangle ».....	(57)
III.7 Modélisation de transformateur monophasé.....	(58)
III.7.1 Modèle électrique équivalent.....	(58)
III.8 Modélisation du groupe diesel.....	(59)
III.9 Conclusion.....	(60)

Chapitre IV : Simulation numérique du système hybride PV/Diesel

IV.1 Introduction.....	(61)
IV.2 Stratégie de gestion d'énergie.....	(61)

IV.3 Générateur diesel.....	(62)
IV.4 Profil de charge.....	(63)
IV.5 Profil d'ensoleillement.....	(64)
IV.6 Résultat de simulation du système global et interprétations des résultats.....	(65)
IV.6.1 Système PV.....	(65)
IV.6.2 Batterie.....	(67)
IV.6.3 Charge.....	(70)
IV.6.4 Courbe des puissances.....	(72)
IV.7 Conclusion.....	(73)
Conclusion générale.....	(74)
Références bibliographiques.....	(75)
Annexes.....	(79)

Liste des figures

Figure (I.1) : Rayonnement solaire mesuré au sommet de l'atmosphère et au niveau de la mer	(04)
Figure(I.2) : Représentation schématique d'une jonction P-N	(05)
Figure (I.3) : Caractéristiques courant-tension d'une photodiode	(06)
Figure (I.4) : Principe de l'effet photoélectrique d'une cellule	(07)
Figure (I.5) : Cellules, modules et panneaux solaires photovoltaïques	(11)
Figure (I.6) : Courbe caractéristique I-U	(12)
Figure (I.7) : Schéma électrique équivalent du modèle à une diode	(13)
Figure (I.8) : Caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ et fonctionnement de la méthode Perturbation et Observation	(16)
Figure (I.9) : Organigramme de la méthode Perturbation et Observation	(17)
Figure (I.10) : Diagramme de Ragone des systèmes électrochimiques rechargeables	(18)
Figure (I.11) : Configuration de générateur diesel	(22)
Figure (I.12) : Configuration PV/Diesel série	(24)
Figure (I.13) : Configuration commutée	(25)
Figure (I.14) : Configuration PV/Diesel parallèle	(26)
Figure (II.1) : Localisation géographique du site en étude	(34)
Figure (II.2) : Image satellite du site en étude	(35)
Figure (II.3) : Inclinaison et orientation des panneaux photovoltaïques	(35)
Figure (II.4) : Moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue sur une surface horizontale en Algérie (insolation en Wh/m^2)	(36)
Figure (II.5) : Représentation graphique Irradiation globale moyenne mensuelle sur un plan incliné de 45° à Bejaia	(37)
Figure (II.6) : Groupe électrogène	(39)
Figure (II.7) : Champ photovoltaïque alimentant une habitation isolée	(40)
Figure (II.8) : Montage deux Panneaux photovoltaïques reliés en série	(41)

Figure (II.9) : Montage panneaux photovoltaïques en parallèle	(41)
Figure (II.10) : Batterie Plomb-Acide	(42)
Figure (II.11) : Schéma de montage de champ de batteries Acide-Plomb	(43)
Figure (III.1) : Installation type d'un système PV/Diesel parallèle	(44)
Figure (III.2) : Caractéristique I-V d'un module PV selon l'irradiation à $T_c = 25\text{ C}^\circ$	(46)
Figure (III.3) : Caractéristique P-V d'un module PV selon l'irradiation à $T_c = 25\text{ C}^\circ$	(46)
Figure (III.4) : Caractéristique I-V d'un module PV selon la température à $G = 1000\text{ Wh/m}^2$	(47)
Figure (III.5) : Caractéristique P-V d'un module PV selon la température à $G = 1000\text{ Wh/m}^2$	(47)
Figure (III.6) : Caractéristique I-V du champ PV selon l'irradiation à $T_c = 25\text{ C}^\circ$	(48)
Figure (III.7) : Caractéristique P-V du champ PV selon l'irradiation à $T_c = 25\text{ C}^\circ$	(49)
Figure (III.8) : Caractéristique I-V du champ PV selon la température à $G = 1000\text{ Wh/m}^2$	(49)
Figure (III.9) : Caractéristique P-V du champ PV selon la température à $G = 1000\text{ Wh/m}^2$	(50)
Figure (III.10) : Circuit électrique d'un hacheur élévateur	(50)
Figure (III.11) : Onde de courant et tension du hacheur élévateur	(52)
Figure (III.12) : Principe de la commande MLI de hacheur élévateur	(53)
Figure (III.13) : Principe de fonctionnement du régulateur PI	(53)
Figure (III.14) : Modèle électrique de la batterie	(54)
Figure (III.15) : Chaîne de conversion d'énergie	(55)
Figure (III.16) : Schéma électrique d'un onduleur de tension à commande MLI	(56)
Figure (III.17) : Principe de la commande MLI	(57)
Figure (III.18) : Symbole d'un transformateur monophasé	(58)
Figure (III.19) : Schéma électrique du transformateur monophasé	(59)
Figure (III.20) : Diagramme fonctionnel du générateur diesel	(60)
Figure (IV.1) : Stratégie de gestion d'énergie dans le système hybride	(61)

Figure (IV.2) : Courbe du couple mécanique du générateur diesel	
Figure (IV.3) : Courbe de la puissance du générateur diesel	
Figure (IV.4) : Graphe de profil de charge de notre habitation isolée	(62)
Figure (IV.5) : Profil d'ensoleillement journalier	(63)
Figure (IV.6) : Courbe du courant du champ PV	(64)
Figure (IV.7) : Courbe de la tension V_{pv} du champ PV	
Figure (IV.8) : Courbe P_{pv} - V_{pv} du champ PV	(64)
Figure (IV.9) : Courbe de la puissance du champ PV fournie	(65)
Figure (IV.10) : Courbe de tension du système de stockage	(66)
Figure (IV.11) : Courbe de la puissance délivrée par la batterie	(67)
Figure (IV.12) : Courbe du courant de la batterie	(67)
Figure (IV.13) : Courbe de l'état de charge (EDC) de la batterie	(68)
Figure (IV.14) : Allure du courant et de la tension au secondaire du transformateur pour vingt-quatre heures	(68)
Figure (IV.15) : Allure du courant-tension au secondaire du transformateur	(69)
Figure (IV.16) : Courbes de V_{eff} et de I_{eff} au secondaire de transformateur	(70)
Figure (IV.17) : Courbes des puissances (P_{pv} , P_{ch} , P_{batt})	(71)

Liste des tableaux

Tableau (I.1) : Caractéristique du silicium	(08)
Tableau (I.2) : Comparatif des différentes technologies de cellules photovoltaïque	(10)
Tableau (I.3) : Tableau comparatif des caractéristiques principales pour les différentes technologies de batteries	(21)
Tableau (II.1) : Différents types d'ampoules existants sur le marché	(29)
Tableau (II.2) : Appareils courant à faible consommation	(30)
Tableau (II.3) : Appareils courant à forte puissance électrique	(31)
Tableau (II.4) : Consommation journalière en (Hiver)	(32)
Tableau (II.5) : Consommation journalière en (été)	(33)
Tableau (II.6): Irradiation globale moyenne mensuelle sur un plan incliné de 45° à Bejaia	(37)
Tableau (II.7) : Puissance crête mensuelle produite par le champ photovoltaïque	(38)
Tableau (II.8) : Energie produite mensuelle par le champ et déficit d'énergie couvert par le groupe diesel	(39)
Tableau (III.1) : Paramètres du module photovoltaïque utilisés aux conditions STC	(45)

- PV : Photovoltaïque
- E_{ph} : Quantité d'énergie
- λ : Longueur d'onde
- h : Constante de Planck
- C : Vitesse de la lumière
- UV : Ultra violet
- Si : Silicium
- I_{sc} : Courant de court-circuit
- V_{co} : Tension en circuit ouvert
- P_m : Puissance maximale
- I_{pv} : Courant généré par la cellule photovoltaïque
- I_{ph} : Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident)
- I_d : Courant circulant dans la diode
- I_{sh} : Courant circulant dans la résistance R_{sh}
- R_s : Résistance série symbolise la résistance de masse du matériau semi conducteur, ainsi les résistances ohmiques et de contact au niveau des connexions des cellules
- V_{pv} : Tension de sortie
- I_0 : Courant de saturation inverse de la diode
- K_i : Coefficient de sensibilité du courant par la variation de la température
- K_v : Coefficient de sensibilité de la tension par la variation de la température
- α : Facteur d'idéalité de la diode
- V_t : Tension thermique
- N_s : Nombre de cellules connectés en série
- k : Constante de Boltzmann
- T : Température de la jonction P-N
- q : Charge de l'électron
- R_{sh} : Résistance shunt, représente les fuites autour de la jonction P-N dues aux impuretés et sur les coins de la cellule
- MPPT : Recherche du Point de Puissance Maximale (Maximum Power Point Tracking)
- V_{opt} : Tension optimale appelé aussi tension au point de puissance maximale (V_{mpp})
- I_{opt} : Courant optimum appelé aussi courant au point de puissance maximale (I_{mpp})
- PPM : Point de puissance maximum

- P&O : Méthode de perturbation et d'observation
- V_{pv} : Tension photovoltaïque
- I_{pv} : Courant photovoltaïque
- P_{pv} : puissance photovoltaïque
- Ni-Cd : Nickel-Cadmium
- Ni-MH : Nickel-Métal Hydrure
- Li-ion : Lithium-ion
- Pb-O₂ : Oxyde de plomb
- MS : Machine synchrone
- CA : Courant alternatif
- CC : Courant continu
- P_c : Puissance crête du champ photovoltaïque
- E_{bes} : Besoin journalier
- E_{stc} : Ensoleillement dans les conditions STC
- E_{mes} : Ensoleillement du site d'installation
- C_p : Facteur de conversion appliqué pour tenir compte des différentes pertes
- $E_{éle}$: Énergie électrique mensuelle fournie par le champ photovoltaïque
- ΔE : Déficit d'énergie fournis par le GD (+), ou le surplus fournis par le champ PV (-)
- N_{pv} : Nombre de panneau
- P_c : Puissance totale de champs photovoltaïque
- $P_{pv \text{ unitaire}}$: Puissance d'un module photovoltaïque
- C_B : Capacité total des batteries
- J_{Auto} : Nombre de jour d'autonomie
- V_B : Tension de la batterie
- PMD: Profondeur maximale de décharge
- K_B : Coefficient de température de la batterie
- K_i : Coefficient d'influence de la température sur le courant
- K_v : Coefficient d'influence de la température sur la tension
- α : Rapport cyclique
- V_s : Tension de sortie
- V_e : Tension d'entré
- I_e : Courant d'entré

- I_s : Courant de sortie
- R_{ch} : Résistance de la charge
- f : Fréquence d'échantillonnage
- L_{min} : Inductance minimal du hacheur
- C_{min} : Capacité minimal du hacheur
- v_r : Ondulation de la tension
- $C_{(p)}$: Fonction de transfert de régulateur PI
- K_p : Gain proportionnel du régulateur PI
- T_i : Constante de temps du régulateur PI
- C_{batt} : Capacité de la batterie
- η_{batt} : Rendement de la batterie
- R_{batt} : Résistance de la batterie
- I_{batt} : Courant de la batterie
- t : Temps de décharge de la batterie
- V_{b-ch} : Equation de charge de la batterie
- $V_{b-déch}$: Equation de décharge de la batterie
- V_{dc} : Tension continue
- V_{ac} : Tension alternative
- V_m : Tension modulée à la sortie de l'onduleur
- E : Tension continue à l'entrée d'onduleur
- v_m : Amplitude de la tension de sortie après filtrage
- m : Indice de modulation
- r : Coefficient de réglage en tension
- m_p : Rapport de transformation
- N_1 : Nombres de spires au primaire
- N_2 : Nombres de spires au secondaire
- T_{diesel} : Couple développé par le moteur diesel
- F : Gain relative au niveau du combustible
- EDC : Etat de charge
- FFT : Décomposition en série de fourrier
- GD : Générateur diesel

Introduction générale

L'énergie est au centre de l'économie pour tous les pays et à la base de toute activité humaine, ces sources se sont diversifiées au cours du temps afin de satisfaire une demande toujours croissante. Les pays développés sont ainsi passés du bois au charbon, à des hydrocarbures plus avancés, à l'hydroélectricité, enfin au nucléaire. Cependant, les réserves de combustible fossiles et nucléaire sont limitées. En plus, l'utilisation des combustibles fossiles est responsable des pluies acides et du réchauffement de la planète, et l'exploitation de l'énergie nucléaire présente des risques d'accident graves sans parler de ceux induit par la gestion des déchets résultants dont la dangerosité radioactive peut durer plusieurs milliers d'années [03].

Les énergies renouvelables, sont une alternative prometteuse vu que la planète est à bout de souffle et dans l'objectif de limiter le danger des énergies fossiles sur l'environnement, L'énergie éolienne, solaire, thermique et géothermique, marémotrice hydroélectrique et la biomasse sont autant de forme d'exploitation du potentiel énergétique répartis sur différents sites.

L'exploitation de ces énergies se fait en mono source ou en hybride et en mode autonome ou bien connectés au réseau. Car leur production est directement liée aux conditions météorologique et la situation géographique de site donné, ces sources sont intermittentes. Ainsi, le mixage de plusieurs sources assure une bonne couverture durant toutes les saisons de l'année.

L'installation d'un système de stockage d'énergie est une nécessité incontournable, pour assurer un bon équilibre entre la production et la consommation. De plus, des sources d'énergies complémentaire telles que des groupes électrogènes sont demandés pour bien compenser ou couvrir en cas de manque d'énergie renouvelable. Pour se faire, une architecture de connexion convenable s'impose pour assurer une bonne alimentation et garantir une exploitation optimale de l'énergie produite.

Dans ce contexte, on s'intéresse au système hybride photovoltaïque-diesel autonome. C'est un système qui allie l'énergie photovoltaïque et un groupe électrogène, qui peut convenir pour une installation non connectée au réseau.

Le but de notre travail est d'étudié, dimensionné et simulé un système hybride photovoltaïque-diesel afin d'assurer le besoin journalier en énergie électrique d'une habitation isolée.

Le premier chapitre, rappelle brièvement les principes de l'énergie solaire-photovoltaïque, les modes de stockages d'énergies, et la description des systèmes hybrides.

Le second chapitre porte sur l'évaluation du besoin énergétique d'une habitation isolée, ainsi que le dimensionnement de chaque composant constituant le système.

Le troisième chapitre concerne la modélisation du système hybride photovoltaïque-diesel, ainsi que les domaines d'applications.

Le quatrième chapitre sera consacré à la schématisation globale du système, simulation numérique et l'interprétation des résultats.

I.1 Introduction

L'utilisation photovoltaïque de l'énergie solaire consiste à convertir directement le rayonnement lumineux en électricité. Cette conversion est assurée par des modules ou panneaux photovoltaïque, composés de cellules photovoltaïques ou photopiles. La conversion photovoltaïque est basée sur l'absorption des photons dans un matériau semi-conducteur qui fournit des charges électriques, donc du courant électrique, dans un circuit extérieur.

Dans cette partie, on commence par rappeler brièvement le principe de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique reposant sur l'effet photoélectrique des semi-conducteurs, ainsi que les différents types de stockage d'énergie par batteries électrochimiques accompagné d'un générateur diesel. Nous évoquerons aussi l'intérêt des systèmes hybrides PV/Générateur diesel avec batteries de stockage pour une installation domestique isolée.

I.2 Energie solaire

Les réactions se produisant à la surface du soleil génèrent une puissance de ($3,8 \times 10^{23}$ kW). Même si l'essentiel se perd dans l'espace, la minuscule fraction atteignant la terre ($1,7 \times 10^{16}$ kW) couvre plusieurs milliers de fois les besoins en énergie de l'humanité tout entière [1].

L'énergie que nous tirons du bois, du pétrole et de ses dérivés, du charbon, de l'hydraulique provient indirectement du soleil ; tout comme nos aliments, d'ailleurs. Les plantes captent et emmagasinent l'énergie solaire, que nous utilisons lorsque nous brûlons du bois ou consommons des aliments. Le soleil gouverne également le cycle des pluies alimentant les rivières qui produisent l'énergie hydroélectrique. Le pétrole et le charbon proviennent de restes de plantes et d'animaux fossilisés qui ont capté l'énergie du soleil il y a des milliers d'années.

D'un point de vue historique, la captation et l'exploitation de l'énergie solaire ont, pour de nombreuses raisons, posé plus de problèmes que celles d'autres formes d'énergies, tout d'abord, contrairement au pétrole et au charbon, qui présentent une forte densité énergétique et une facilité au transport, l'énergie solaire est faiblement concentrée et diffuse. Il faut donc des équipements spécifiques pour la capter, la convertir et la stocker, ensuite, l'énergie solaire n'étant pas disponible la nuit ou quand le ciel est couvert, il faut stocker l'énergie électrique résultant de sa conversion et donc mettre en place des équipements de stockage qui représentent une part importante du coût des installations solaires photovoltaïques [1].

I.3 Rayonnement Solaire

Energie naturelle par excellence, le soleil, cet astre incandescent dont la température de surface est voisine de 5500°C, nous dispense chaleur et lumière. La distance de la terre au soleil est d'environ 150 millions de kilomètres et la vitesse de la lumière est d'un peu plus de 300 000 km/s; les rayons du soleil mettent donc environ 8 minutes à nous parvenir [2].

La *constante solaire* est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au soleil. Sa valeur est communément prise, égale à 1 360W/m² (bien qu'elle varie dans l'année à cause des légères variations de la distance Terre-Soleil) [2].

Le rayonnement solaire est constitué des photons transportant chacun une énergie E_{ph} qui répond, elle-même, à la relation suivante:

$$E_{ph} = h \left(\frac{c}{\lambda} \right) \quad (I.1)$$

Où : E_{ph} : Quantité d'énergie; λ : Longueur d'onde; h : Constante de Planck; C : Vitesse de la lumière [3].

D'après la relation (I.1), cette énergie est inversement proportionnelle à la longueur d'onde. Le flux d'énergie solaire est alors transmis sous forme de rayonnement électromagnétique dont les longueurs d'ondes sont assez différentes du corps noir dans l'espace, mais encore plus sur la terre tel que le montre la figure (I.1).

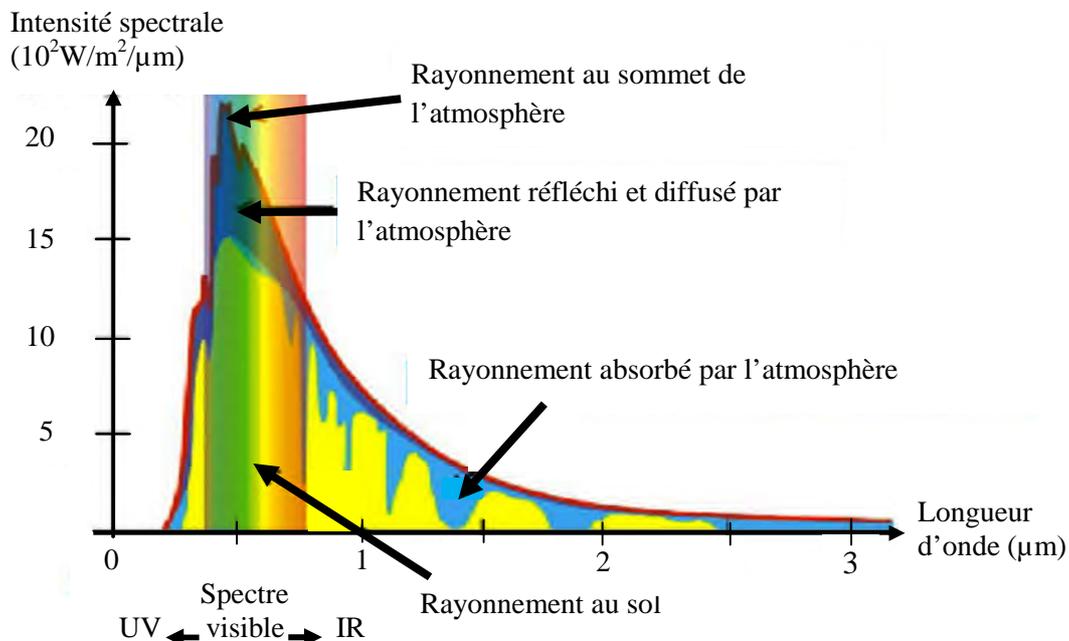


Figure (I.1): Rayonnement solaire mesuré au sommet de l'atmosphère et au niveau de la mer

I.4 Jonction P-N

La mise en contact de deux zones à dopages opposées dans un semi-conducteur constitue un élément fort connu: la diode. A l'interface où les concentrations d'atomes étrangers font passer le silicium du type P au type N apparaît une région appelée zone de charge d'espace qui provient de la tendance des électrons excédentaires de la couche N à vouloir passer du côté P, où ils sont attirés par les trous excédentaires, et de la tendance des trous à vouloir passer du côté N par réciprocity. Cet échange de porteurs dans la zone de charge spatiale crée un champ électrique qui va contrebalancer l'échange de charge et rétablir l'équilibre. La représentation schématique d'une jonction P-N est présentée sur la figure (I.2).

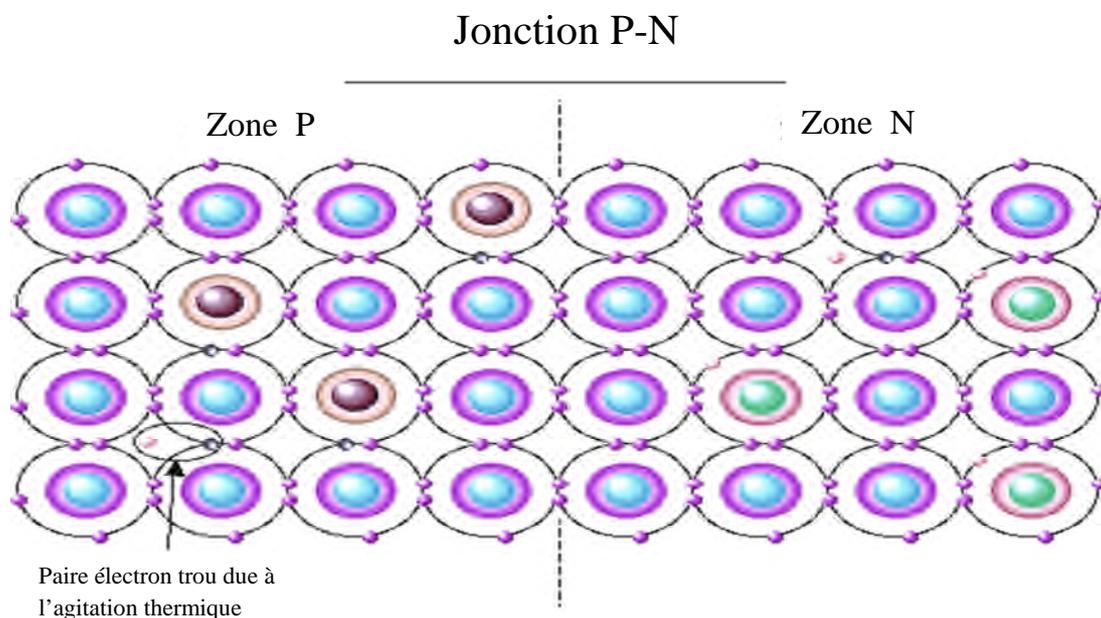


Figure (I.2): Représentation schématique d'une jonction P-N

La cellule solaire est donc le plus souvent une tranche de silicium dopé P d'un côté, et N de l'autre, à laquelle sont ajoutés des contacts électriques pour collecter le courant, cette jonction a donc les caractéristiques électriques d'une diode au silicium classique avec, sous illumination, apparition d'un photo-courant indépendant de la tension est proportionnel au flux lumineux et à la surface de la cellule [4].

I.5 Cellule photovoltaïque

On appelle cellule solaire un convertisseur optoélectronique qui permet la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Les photopiles ou cellules solaire sont des éléments de base d'un générateur photovoltaïque elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs [5,6].

I.5.1 Caractéristique courant/tension d'une photopile

La jonction servant de base à la photopile est une diode. Lorsqu'elle est illuminée, apparaît dans cette diode un photo-courant qui dépend de la quantité de lumière incidente. D'où le terme photodiode, également employé pour désigner une photopile [4]. La figure (I.3) présente les deux caractéristiques courant-tension de cette photodiode: dans l'obscurité en trait pointillé, et sous illumination en trait plein.

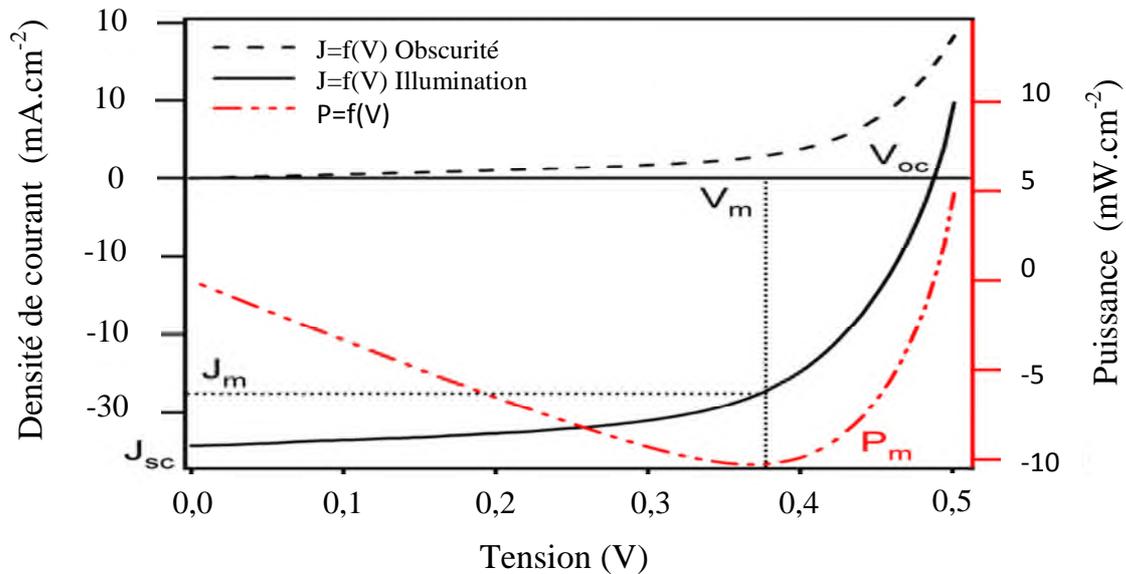


Figure (I.3): Caractéristiques courant-tension d'une photodiode

I.5.2 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïque exploitent les propriétés électriques particulières du silicium (et d'autres matériaux semi-conducteurs) qui lui permettent de fonctionner comme isolateur et comme conducteur. Des « tranches » de silicium spécialement traitées « trient » ou « forcent » des électrons arrachés par l'énergie solaire à traverser un champ électrique créé sur une cellule afin de produire une différence de potentiel (un courant électrique). D'autres matériaux sont utilisés, mais les cellules photovoltaïques sont, en générale, fabriquées à base du silicium.

Le rayonnement solaire est constitué de particules subatomiques de haute énergie appelées photons. Chaque photon transporte une quantité d'énergie donnée (qui dépend de la longueur d'onde) et certains photons en transportant plus que d'autres. Lorsqu'un photon d'énergie suffisante, rencontre un atome de silicium dans une cellule photovoltaïque, il « arrache » un électron qui peut ainsi traverser le champ électrique de la cellule que l'on appelle: la jonction P-N (positive-négative). Ces électrons ne peuvent pas revenir. Lorsque plusieurs électrons traversent le champ de la cellule, à l'arrière de celle-ci développe une charge négative.

Si une charge est connectée entre le côté négatif et le côté positif de la cellule, comme le montre la figure (I.4), le flux d'électrons génère un courant électrique. Ainsi, l'énergie solaire (sous forme de photons) arrache continuellement des électrons de silicium à leurs orbites et crée une tension qui « pousse » les électrons dans les fils sous forme d'un courant électrique. Plus la lumière solaire est intense et plus le courant est intense. Dès que la cellule ne reçoit plus de lumière, le courant s'arrête [1].

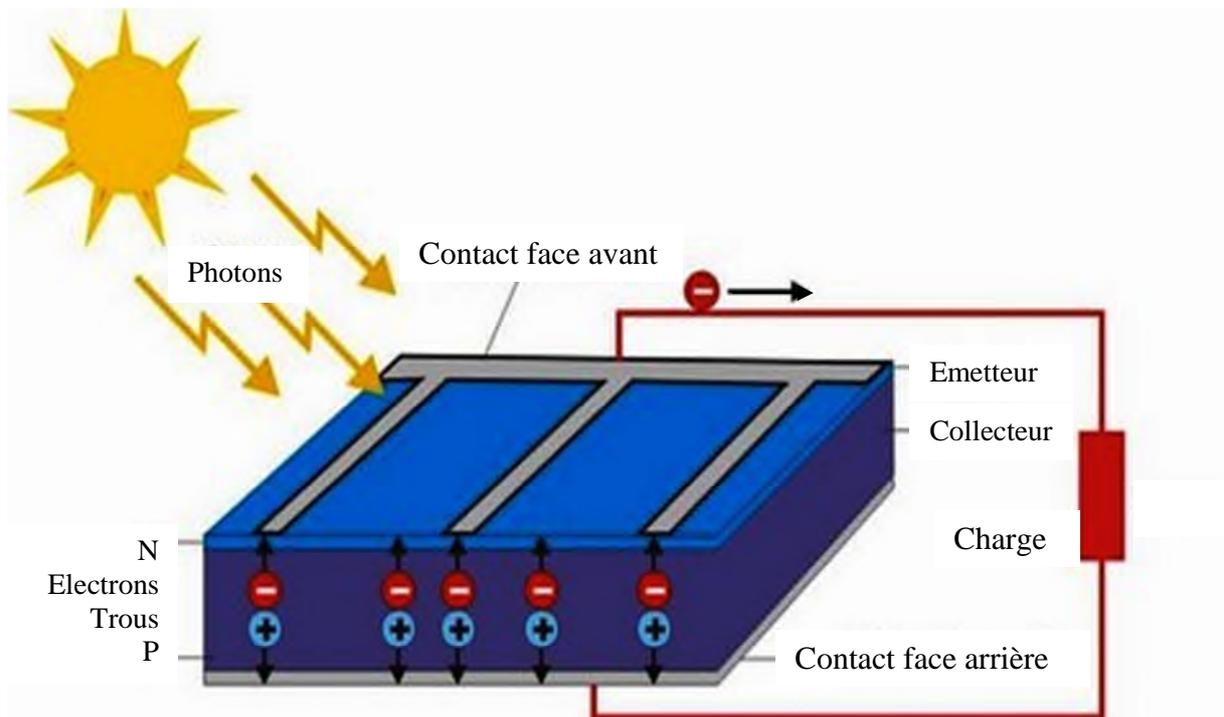


Figure (I.4): Principe de l'effet photoélectrique d'une cellule

I.5.3 Technologies et types de cellules photovoltaïque

Le matériau de base utilisé actuellement est le silicium. Celui-ci se trouve en très grande quantité sur notre planète puisqu'il constitue environ 28% de l'écorce terrestre. En fait, on le trouve surtout sous forme de dioxyde de silicium (SiO_2) qui est le constituant principal du sable. Il est donc abondant et peu coûteux.

I.5.3.1 Caractéristiques du Silicium

Le silicium est l'élément chimique de numéro atomique 14, de symbole Si. C'est un membre du groupe des cristallogènes. Quelques-unes de ces propriétés sont données au tableau (I.1).

Tableau (I.1): Caractéristique du silicium

Symbole	Propriété	Valeur
Si	Nombre atomique	14
	Masse atomique	28.086
	Masse volumique	2330 kg/m ³
	Température de fusion	1683 k
	Température d'ébullition	2628 k
	Coefficient de dilatation thermique	4,2 .10 ⁻⁶ k ⁻¹

Cependant, pour être utilisable en électronique, le silicium doit être très pur. Il suffit d'un atome d'impureté sur un million pour multiplier les porteurs de charge par dix millions. Cette pureté coûte très cher à aboutir [7].

En fonction de la structure microscopique du silicium, on trouve des cellules photovoltaïques à base du silicium monocristallin, polycristallin ou amorphe.

Il existe plusieurs types de cellules en fonction de la structure microscopique du silicium:

I.5.3.2 Cellules en Silicium monocristallin

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

A) Avantages

- ✓ Très bon rendement (18%) [9].

B) Inconvénients

- ✓ Cout élevé;
- ✓ Rendement faible sous un faible éclairement.

I.5.3.3 Cellules en silicium polycristallin

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

A) Avantages

- ✓ Ce sont les cellules les plus utilisées pour la production électrique (meilleur rapport qualité prix);
- ✓ Bon rendement (13%), (mais moins bon que pour le monocristallin);
- ✓ Moins coûteux que le monocristallin.

B) Inconvénients

- ✓ Rendement faible sous un faible éclairement.

I.5.3.4 Cellules en silicium amorphe

Le silicium n'est pas cristallisé, il est déposé sur une feuille de verre. La cellule est grise très foncée. C'est la cellule des calculatrices et des montres.

A) Avantages

- ✓ Fonctionnement avec un éclairement faible;
- ✓ Moins coûteux que les autres technologies.

B) Inconvénients

- ✓ Rendement faible en plein soleil (environ 7%);
- ✓ Performances diminuent sensiblement avec le temps.

D'autres technologies prometteuses comme les matériaux organiques, les matériaux nanocristallin ou les structures multi-jonctions laissent présager d'excellentes performances futures et sont aujourd'hui au stade de la recherche [8].

I.5.4 Comparaison des différentes technologies

Les cellules photovoltaïques de première génération sont à base de silicium pur, un matériau coûteux. D'autres technologies ont depuis été mises au point, en cherchant à utiliser moins de silicium, voir en trouvant un substitut à ce matériau semi-conducteur. Mais la plupart de ces innovations ne sont pas encore assez performantes pour se substituer aux cellules en silicium.

Les caractéristiques des différentes technologies de cellules photovoltaïques, leur rendement, leur durée de vie ainsi que leurs principales utilisations sont dressées dans le tableau (I.2).

Tableau (I.2): Comparatif des différentes technologies de cellule photovoltaïque [9]

Matériaux	Rendement	Longévité	Caractéristiques	Principales utilisations
Silicium monocristallin	12 à 18% (24.7% en laboratoire)	20 à 30 ans	<ul style="list-style-type: none"> • Très performant ; • Stabilité de production d'énergie; • Méthode de production coûteuse et laborieuse. 	Aérospatiale, Modules pour toits, façades, etc.
Silicium polycristallin	11 à 15% (19.8% en Laboratoire)	20 à 30 ans	<ul style="list-style-type: none"> • Adapté à la production à grande échelle; • Stabilité de production d'énergie; • Plus de 50% du marché mondial. 	Modules pour toits, façades, générateurs, etc.
Silicium amorphe	5 à 8 % (13% en laboratoire)	15 à 25 ans	<ul style="list-style-type: none"> • Peut fonctionner sous la lumière fluorescente; • Fonctionnement à faible luminosité; • Fonctionnement par temps couvert; • Fonctionnement à ombrage partiel; • La puissance de sortie varie dans le temps. En début de vie, la puissance délivrée est 15 à 20% supérieure à la valeur nominale et se stabilise après quelques mois. 	Appareils électromagnétiques (montres, calculatrices, etc), Intégration dans le bâtiment.

I.6 Modules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques sont extrêmement déverses. Elles diffèrent par le matériau qui les constitue et par la taille. Il faut donc les choisir avec soin en fonction des charges prévues.

La quantité d'électricité produite par une cellule dépend de sa taille et de son type. Une cellule monocristalline de 10 cm² produit un courant d'environ 3,5 Ampère dans des conditions normales d'essai en laboratoire. Une cellule au silicium amorphe de même taille ne produirait qu'environ un tiers de cette quantité d'électricité [1].

Pendant, toutes les cellules photovoltaïques au silicium créent une différence de potentiel (tension) entre 0,4 et 0,5 Volt en fonctionnement normal. Il faut donc les connecter en série pour obtenir une tension exploitable. Une cellule produisant une tension de 0,5 Volt ne pourra pas faire fonctionner une radio qui demande 3 Volt. Cinq cellules en série sont suffisantes pour alimenter une calculatrice de 2 Volt mais 36 cellules sont nécessaires pour charger une batterie de 12 Volt [1].

I.6.1 Des cellules photovoltaïques aux modules photovoltaïques

Plusieurs cellules photovoltaïques reliées en séries, enrobées dans une résine transparente ou enfermées hermétiquement dans du verre ou du plastique, et intégrées à un cadre métallique, forment un module photovoltaïque, comme illustré sur la figure (I.5). Des groupes de modules montés ensemble forment des panneaux solaires photovoltaïques.

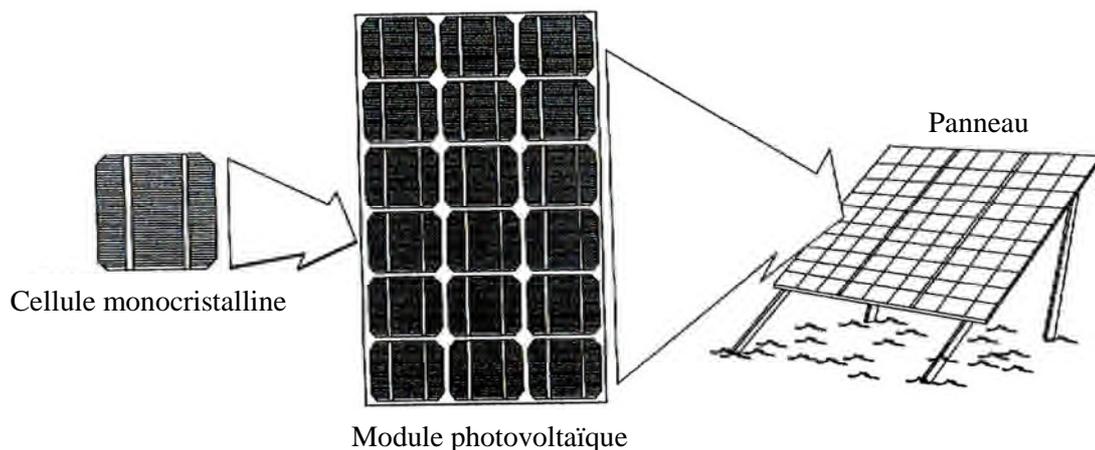


Figure (I.5): Cellules, modules et panneaux solaires photovoltaïques

Le processus de fabrication des modules photovoltaïques à partir de cellules de silicium monocristallin et multi cristallin comporte plusieurs étapes. Une fois prêtes et revêtues d'un matériau anti-réfléchissant, les cellules photovoltaïques sont soudées ensemble en série

(l'avant d'une cellule est relié à l'arrière de la suivante) puis montées entre du verre et du plastique. Le processus d'assemblage des cellules photovoltaïque monocristallines ou multicristallines entre verre et plastique s'appelle « encapsulage ».

Les cellules sont soudées à haute température entre des couches de plastiques (Éthylène-Acétate de Vinyle; dit EVA) et de verre de telle sorte que l'air et l'eau ne puissent pas pénétrer et corroder les connexions électriques entre les cellules. Les modules sont alors enchâssés dans des cadres de métal ou de plastique qui protègent leurs côtés et les empêchent de se tordre. Le cadre peut comporter des trous de montage et une borne de connexion des câbles de mise à la terre.

Les contacts électriques positifs et négatifs des cellules, vis ou fils, sont fixés au dos du module. Dans le cas de la plupart des modules de forte puissance (au-delà de 40 Wc), les bornes sont intégrées à une boîte de jonction permettant des connexions à des tensions différentes (6 ou 12 Volt, par exemple) [1].

I.6.2 Courbe caractéristique I-U

Les courbes caractéristiques I-U permettent de comparer des modules photovoltaïques et prédire leur performance pour diverses températures, charges et angles d'inclinaison. Chaque cellule ou module photovoltaïque a ses propres caractéristiques de fonctionnement. Sous une tension donnée, un module (ou une cellule) produira une certaine intensité. Ces caractéristiques sont représentées par la courbe intensité-tension (courbe caractéristique I-U).

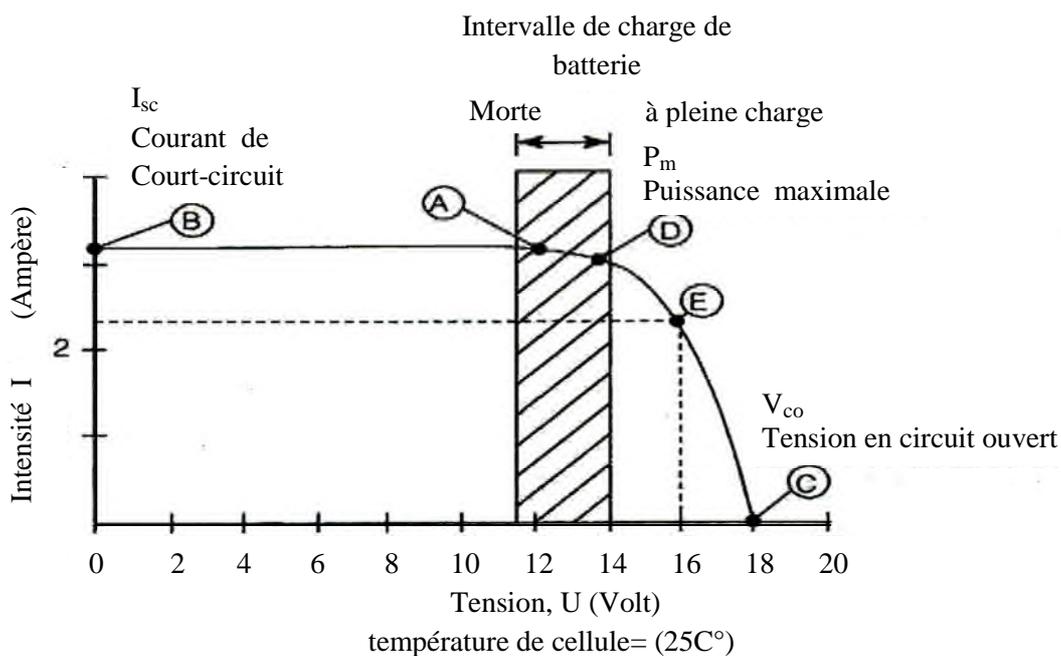


Figure (I.6): Courbe caractéristique I-U

La figure (I.6) montre la courbe caractéristique I-U d'un module d'une puissance nominale de 42 Wc dans les conditions normales d'essai. L'axe des ordonnées (I) indique l'intensité du courant en fonction de la tension. L'axe des abscisses indique la tension générée par le module pour différentes intensités. La puissance du module peut être calculée pour chaque point de la courbe en multipliant l'intensité par la tension. Ainsi, par exemple, si un module charge une batterie à 12 Volt (point A, figure (I.6)), le courant produit par le module a une intensité de 3,2 Ampère et la puissance fournie est de 38,4 W, soit moins que la puissance nominale de 42 Wc) [1].

I.7 Modèle électrique et mathématique de module photovoltaïque

De nombreux modèles mathématiques de générateurs photovoltaïques, ont été développés, dont le but est l'obtention de la caractéristique courant-tension pour l'analyse et l'évaluation des performances des systèmes photovoltaïques. Ces modèles diffèrent entre eux par le nombre de paramètres pris en compte [10]. On prend le modèle le plus classique, qui est le modèle à une diode.

I.7.1 Modèle à une diode

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte d'effets résistifs parasites dues à la fabrication est représenté sur la figure (I.7). Il est constitué d'une diode (D) caractérisant la jonction, une source de courant (I_{ph}) caractérisant le photo-courant, une résistance série (R_s) représentant les pertes par effet Joule, et une résistance shunte (R_{sh}) caractérisant un courant de fuite qui est généralement très supérieure à (R_s) [11].

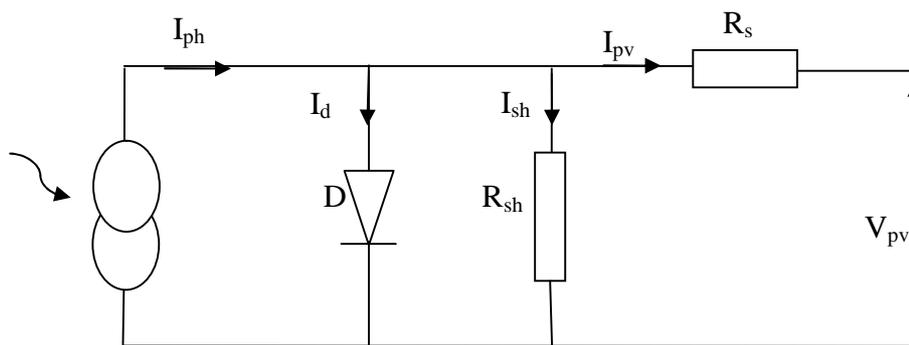


Figure (I.7): Schéma électrique équivalent à une diode d'un module PV

Le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque se met sous la forme mathématique suivante:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (I.2)$$

Avec:

I_{pv} : Courant généré par la cellule photovoltaïque;

I_{ph} : Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident);

I_d : Courant circulant dans la diode;

I_{sh} : Courant circulant dans la résistance R_{sh} .

$$I_{ph} = \frac{G}{G_n} (I_{sc,n} + K_i \Delta T) \quad (I.3)$$

Avec:

$$\Delta T = T - T_n$$

G : Ensoleillement mesuré ;

G_n : Ensoleillement nominale ;

T : Température mesuré ;

T_n : Température nominale.

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{V_t}} - 1 \right) \quad (I.4)$$

R_s : Résistance série symbolise la résistance de masse du matériau semi conducteur, ainsi les résistances ohmiques et de contact au niveau des connexions des cellules;

V_{pv} : Tension de sortie;

I_0 : Courant de saturation inverse de la diode [37].

$$I_0 = \frac{I_{sc,n} + K_i \Delta T}{e^{\left(\frac{V_{oc,n} + K_v \Delta T}{\alpha V_t} \right) - 1}} \quad (I.5)$$

I_{sc} : Courant en court circuit ;

V_{oc} : Tension en circuit ouvert

K_i : Coefficient de sensibilité du courant par la variation de la température (mA⁰C);

K_v : Coefficient de sensibilité de la tension par la variation de la température;

α : Facteur d'idéalité de la diode;

V_t : Tension thermique.

$$V_t = \frac{N_s k T}{q} \quad (I.6)$$

N_s : Nombre de cellules connectés en série;

k: Constante de Boltzmann ($1,3806503 \times 10^{-23}$ J/K);

T: Température de la jonction P-N (K);

q: Charge de l'électron ($1,60217646 \times 10^{-19}$ C);

R_{sh} : Résistance shunt, représente les fuites autour de la jonction P-N dues aux impuretés et sur les coins de la cellule.

$$I_{sh} = \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}} \quad (I.7)$$

Le courant I_{pv} devient:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{V_t \alpha}} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}} \quad (I.8)$$

I.8 Commande MPPT

Des lois de commandes spécifiques existent pour amener des dispositifs à fonctionner à des points maximums de leurs caractéristiques. Pour le cas de sources énergétiques, cela se traduit par des points de puissance maximum. Ce type de commande est souvent nommé « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou bien « Maximum Power Point Tracking » en anglo-saxon (MPPT).

Diverses publications sur les commandes MPPT apparaissent régulièrement dans la littérature depuis 1968, date de publication de la première loi de commande de ce genre, adaptée à une source d'énergie renouvelable de type photovoltaïque [38].

Par définition, une commande MPPT, associé à un convertisseur DC/DC d'adaptation permet de faire fonctionner un générateur photovoltaïque de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance, quelques soient les conditions météorologiques (irradiation, température) [12]. Cette commande ainsi place le système au point de fonctionnement optimal (V_{opt} , I_{opt}). Le premier système de puissance MPPT a été introduit en 1968 pour un système spatial [13]. Au cours des années, plusieurs algorithmes (MPPT) ont été développés et largement adaptés pour déterminer le point de puissance maximum (PPM) [14]. Nous présenterons la méthode de perturbation et d'observation (P&O) qui est la plus couramment utilisée.

I.8.1 Méthode de perturbation et d'observation (P&O)

C'est la méthode la plus utilisée vu sa simplicité. Une boucle de retour et peu de mesures sont nécessaires. Le principe des commandes MPPT de type **P&O** consiste à

perturber la tension V_{pv} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{pv} qui en résulte [15-16]. Ainsi, comme l'illustre la figure (I.8), on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre un accroissement de la puissance P_{pv} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié. En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM.

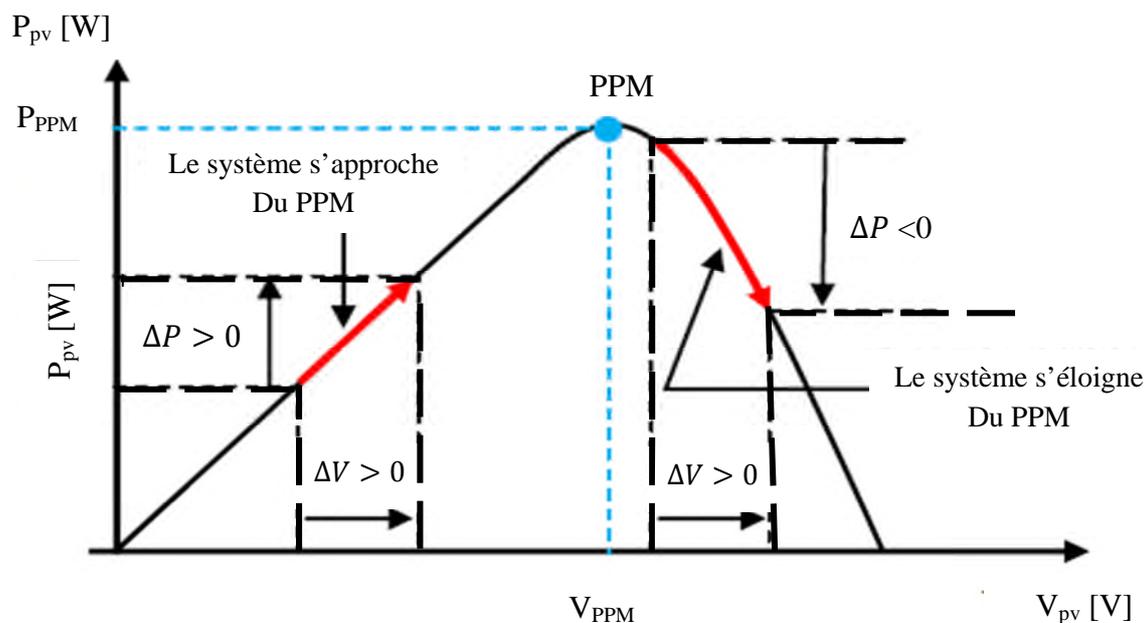


Figure (I.8): Caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ et fonctionnement de la méthode Perturbation et Observation

La Figure (I.9) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Les avantages de cette méthode peuvent être récapitulés comme suit: la connaissance des caractéristiques de générateur photovoltaïque n'est pas exigée, c'est une méthode relativement simple. Néanmoins, en régime permanent, le point de fonctionnement oscille autour du MPP, provoquant ainsi une perte d'énergie.

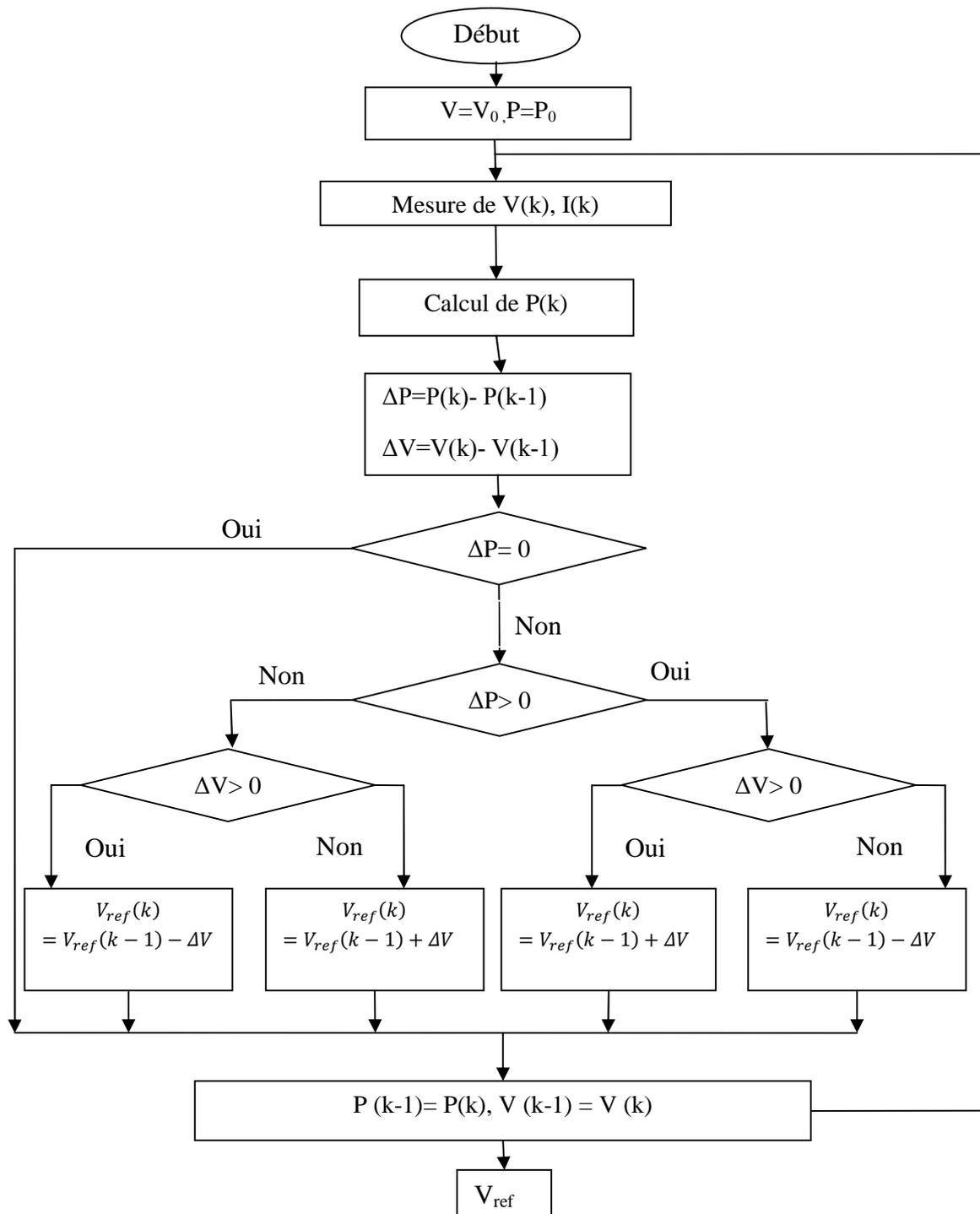


Figure (I.9): Organigramme de la méthode Perturbation et Observation

I.9 Accumulateurs électrochimiques

Bien que le développement scientifique se poursuive, le stockage de l'énergie électrique est toujours un défi. L'utilisation d'une batterie est très importante dans tous les systèmes photovoltaïques et les systèmes hybrides autonomes [17].

Un accumulateur électrochimique ou batterie est un système permettant de convertir de l'énergie électrique en une énergie potentielle chimique durant la phase de charge et de convertir l'énergie potentielle chimique en énergie électrique lors de la décharge. C'est la modification chimique de l'électrolyte qui permet d'accumuler ou de restituer cette énergie [18].

I.9.1 Différents types de batteries

Les différentes technologies rechargeables de stockage d'énergie existantes sont présentées sur la figure (I.10) [19,20]. Les technologies sont distinguées en termes de densités d'énergie et de puissance.

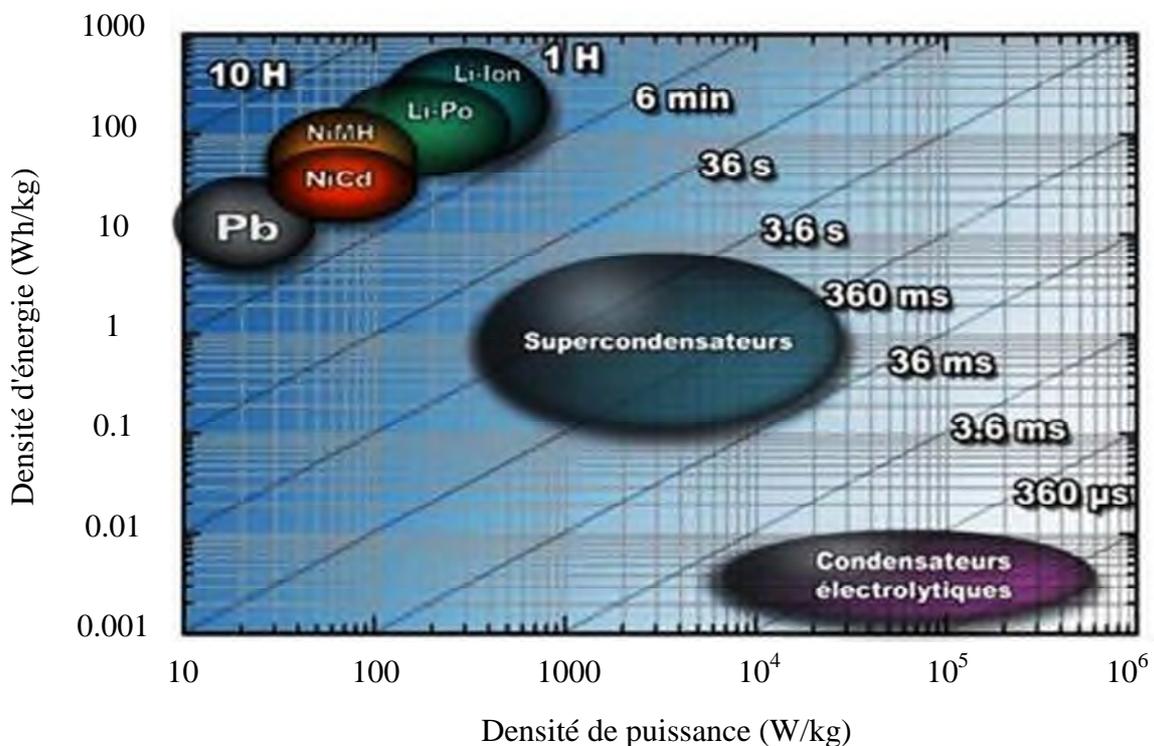


Figure (I.10): Diagramme de Ragone des systèmes électrochimiques rechargeables

I.9.1.1 Batteries au Nickel

Le Nickel est un métal plus léger que le Plomb et propose un potentiel électrochimique intéressant pour une application pour les batteries. On distingue quatre différents couples électrochimiques utilisés par des batteries au nickel: Nickel-Fer, Nickel-Cadmium et Nickel-Métal Hydrure [18].

I.9.1.1.1 Batteries Nickel-Cadmium (Ni-Cd)

Les accumulateurs Nickel-Cadmium ont été découverts en Suède par Waldemar Jungner, qui déposa un premier brevet en 1899, qu'il étendit aux États-Unis en 1901.

Elles utilisent de l'hydroxyde de Nickel pour les plaques positives et de l'oxyde de Cadmium pour les plaques négatives. L'électrolyte est de l'hydroxyde de Potassium. La tension de ce type d'accumulateur varie entre 1,15 et 1,17 Volt, par élément suivant l'état de charge. Le rendement énergétique est de l'ordre de 70% [21].

I.9.1.1.2 Batterie Nickel-Métal Hydrure (Ni-MH)

Les batteries Ni-MH ont remplacé les batteries Nickel-Cadmium dans de nombreuses applications. Elles offrent de meilleures performances sans les problèmes de toxicité du Cadmium [18]. Les batteries Ni-MH sont constituées d'une électrode positive en nickel et d'une électrode négative en Hydrogène absorbé dans du métal [22].

L'électrolyte est composé d'une solution d'Hydroxyde de Potassium. Ce type de batterie est très sensible à l'intrusion d'air. L'Hydrogène réagirait immédiatement. Elles sont pourvues d'une soupape de sécurité pour pouvoir dégazer lors de surcharges. La tension à vide d'une cellule de Nickel-Métal Hydrure varie peu en fonction de son état de charge. Elle reste très proche de 1,2 Volt [18].

I.9.1.2 Batteries Lithium-ion

Ces accumulateurs utilisent un électrolyte liquide organique et la réaction réversible mise en jeu fait intervenir l'insertion d'ions Lithium dans du bisulfure de Titane. Leur tension présente une grande amplitude de variation 2,5 Volt à 3,7 Volt. Grande énergie massique (150 Wh/kg), faible masse volumique, bonne stabilité en température, étanchéité totale. D'un coût 10 fois plus élevé que les batteries au Plomb, elles ne sont encore utilisées que pour les applications de petites puissances.

Autre inconvénient du Li-ion, l'échauffement. Pour contourner l'obstacle, il faut signaler un nouveau concept d'accumulateur au Li, le Li-Métal-Polymère, mis au point par Hydro-Québec, dans lequel, l'électrolyte qui est solide, se présente sous la forme de plusieurs feuilles minces de polymères. Cette technique, bien que moins performante, sera utilisé dans la voiture électrique « Blue car » de Bolloré [25].

I.9.1.3 Batteries Plomb-acide

La batterie Plomb-acide est la plus utilisée dans les installations PV autonomes. Elle a été inventée en 1859 par Gaston Planté et fut utilisée dans le premier véhicule électrique (La Jamais contente) en France en 1881. Ces batteries sont peu chères et leur technologie est maîtrisée. Elles comptent un grand nombre d'applications et permettent de fournir des courants importants. Cependant, la densité énergétique du couple Plomb/Acide est assez faible. Ces performances sont très dépendantes de la température. En dessous de 10 °C, la puissance et la capacité sont alors fortement réduites [18].

I.9.1.3.1 Description

L'élément de 2 Volt est constitué de plaques positives et négatives assemblées en alternance, le nombre de plaques de chaque polarité et leur surface définissant la capacité en courant de l'élément. Pour éviter les courts circuits entre plaques un séparateur microporeux isolant est disposé entre elles [25]:

- ✓ *L'électrode positive* est une plaque rectangulaire en plomb renforcée par des nervures entre lesquelles sont disposées des lamelles ou des tubes constitués par des oxydes de plomb (Pb-O₂);
- ✓ *L'électrode négative* est une plaque de plomb à surface gaufrée dont les alvéoles sont garnies de plomb spongieux;
- ✓ *L'électrolyte* est une solution aqueuse (eau distillée) d'acide sulfurique dont la densité varie en fonction de l'état de charge de la batterie.

I.9.1.3.2 Caractéristiques électriques

A) Capacité en Ampère heure

Les ampères heure d'une batterie sont simplement le nombre d'Ampères qu'elle fournit multiplié par le nombre d'heures pendant lesquelles circule ce courant [23].

B) Température

Un autre facteur qui influence la capacité est la température de la batterie et celle de son atmosphère. Le comportement d'une batterie est spécifié à une température de 27 degrés. Des températures plus faibles réduisent leur capacité significativement. Des températures plus hautes produisent une légère augmentation de leur capacité, mais ceci peut augmenter la perte d'eau et diminuer la durée de vie de la batterie [22].

C) Durée de vie

La durée de vie d'une batterie est le nombre de cycles charge/décharge que la batterie peut soutenir avant de perdre 20% de sa capacité nominale [24].

D) Taux d'autodécharge

L'autodécharge est la perte de capacité en laissant l'accumulateur au repos (sans charge).

E) Tension d'utilisation

Dans le cas de la décharge d'une batterie, la tension minimale acceptable est appelée tension seuil de décharge. La baisse au-dessous de cette tension est appelée décharge profonde, durant laquelle la batterie peut être endommagée. Dans le cadre du photovoltaïque, la tension seuil de décharge pour une batterie au plomb de 12 Volt est de 11,7 Volt.

En ce qui concerne la recharge, une tension supérieure à la tension nominale doit être appliquée. Cette tension ne doit pas dépasser une certaine valeur appelée tension de charge maximale. Pour une batterie de 12 Volt, elle est comprise entre 12 Volt et 14,4 Volt [21].

I.9.2 Comparaison des caractéristiques des batteries électrochimiques

Les principales caractéristiques sont résumées dans le tableau (I.3).

Tableau (I.3): Tableau comparatif des caractéristiques principales pour les différentes technologies [26, 27]

		Batteries			
		Pb-O₂	Ni-Cd	Ni-MH	Li-ion
Densité énergétique (Wh/kg)		15-40	45-80	60-120	110-160
Profondeur de décharge		80%	80%	80%	80%
Tolérance à la surcharge		oui	moyenne	Très faible	Nulle
Autodécharge par mois		5%	20%	30%	10%
Voltage nominal d'une cellule		2V	1,2V	1,2V	3,6V
Plage de températures de fonctionnement	En charge	10 à 40 C°	0 à 45 C°	0 à 45 C°	0 à 45 C°
	En décharge	-20 à 60 C°	-40 à 60 C°	-20 à 60 C°	-20 à 60 C°
Commercialisé depuis		1970	1950	1990	1991

I.10 Générateur diesel

I.10.1 Généralités

Dans le cas des installations à sources d'énergies renouvelables autonomes, il est nécessaire de recourir au stockage ou d'ajouter un ou plusieurs groupes électrogènes ou les deux au même temps [28]. Le groupe électrogène comporte un moteur diesel, qui entraîne un générateur électrique à courant continu, synchrone ou asynchrone, comme il est montré sur la figure (1.11) [29].

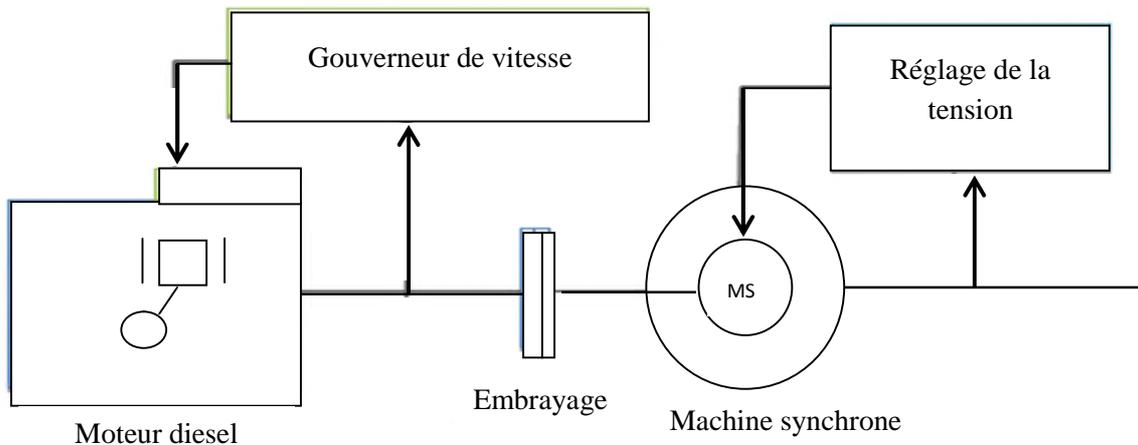


Figure (1.11): Configuration du générateur diesel à base d'une MS

Le groupe électrogène est utilisé pour fournir de l'énergie dans les trois cas suivant[30]:

- ⇒ Fournir de l'énergie de base, dans la centrale électrique diesel;
- ⇒ Fournir de l'énergie de remplacement, lorsque l'énergie de base est couteuse;
- ⇒ Fournir de l'énergie de secours, lorsque l'énergie de base vient à manquer.

I.10.2 Avantages et inconvénients du groupe électrogène

A) Avantages

- ✓ Le groupe électrogène est une source fiable et indépendante des conditions extérieures;
- ✓ Simple à l'installation et l'utilisation [31].

B) Inconvénients

Les principaux inconvénients relatifs à l'utilisation du générateur diesel sont les suivants [31], [29]:

- ✓ Un volume sonore constant quel que soit le niveau de puissance demandé au moteur diesel;
- ✓ Un niveau d'émissions polluantes élevé même lorsque la demande d'énergie est faible;
- ✓ Une mauvaise stabilité de fréquence et de tension, dans les phases transitoires;
- ✓ La présence d'un second moteur diesel en plus du moteur principal sur les applications embarquées;
- ✓ Le surdimensionnement du groupe en cas de charge non linéaires ou non symétriques (redresseur, charge monophasée, etc.);
- ✓ Nécessite un entretien permanent;
- ✓ Nécessite un apport permanent du combustible.

I.11 Systèmes hybrides de production d'électricité

Les systèmes hybrides de production d'électricité se présentent aujourd'hui comme une alternative viable aux systèmes conventionnels utilisant uniquement des générateurs diesel [32]. Cependant la plupart des études dans la littérature spécialisée ont été consacrés à des systèmes hybrides PV/Diesel avec stockage par les batteries d'accumulateurs [33, 34].

Un système hybride de production d'énergie dans sa vision la plus générale, est celui qui combine et exploite plusieurs sources disponibles interconnectées entre elles pour fournir l'alimentation électrique. Il existe plusieurs combinaisons de systèmes hybrides, à savoir : éolien-diesel, photovoltaïque-diesel, éolien-photovoltaïque-diesel, etc. Ces mêmes sources d'énergie peuvent être combinées avec d'autres sources de stockage d'énergie, tel que des batteries électrochimiques, le stockage utilisant l'hydrogène, des volants d'inertie, etc.

La combinaison de l'énergie renouvelable avec des éléments de stockage et des groupes électrogènes, permet d'optimiser les systèmes de production d'électricité, aussi bien du point de vue technique qu'économique [35].

I.11.1 Configurations des systèmes hybrides PV/Diesel avec stockage d'énergie

Le concept d'électricité décentralisée, a encouragé le développement des moyens de production d'origine renouvelable. La tendance actuelle montre que l'intégration de ce type de ressources dans les systèmes électriques isolés se fait en association avec l'utilisation d'une source conventionnelle, tels les générateurs diesel. De cette façon, le générateur photovoltaïque travaille soit en parallèle, soit en alternance avec le générateur diesel.

Il existe, en conséquence, plusieurs configurations de systèmes hybrides PV/Diesel [36]:

- ✓ Les systèmes hybrides PV/Diesel série;
- ✓ Les systèmes hybrides PV/Diesel commuté;

- ✓ Les systèmes hybrides PV/Diesel parallèle.

I.11.1.1 Configuration série

Dans cette configuration, figure (I.12), l'énergie produite par le générateur diesel est d'abord redressée et puis convertie de nouveau en alternatif pour être fournie à la charge, ce qui implique des pertes de conversion significatives.

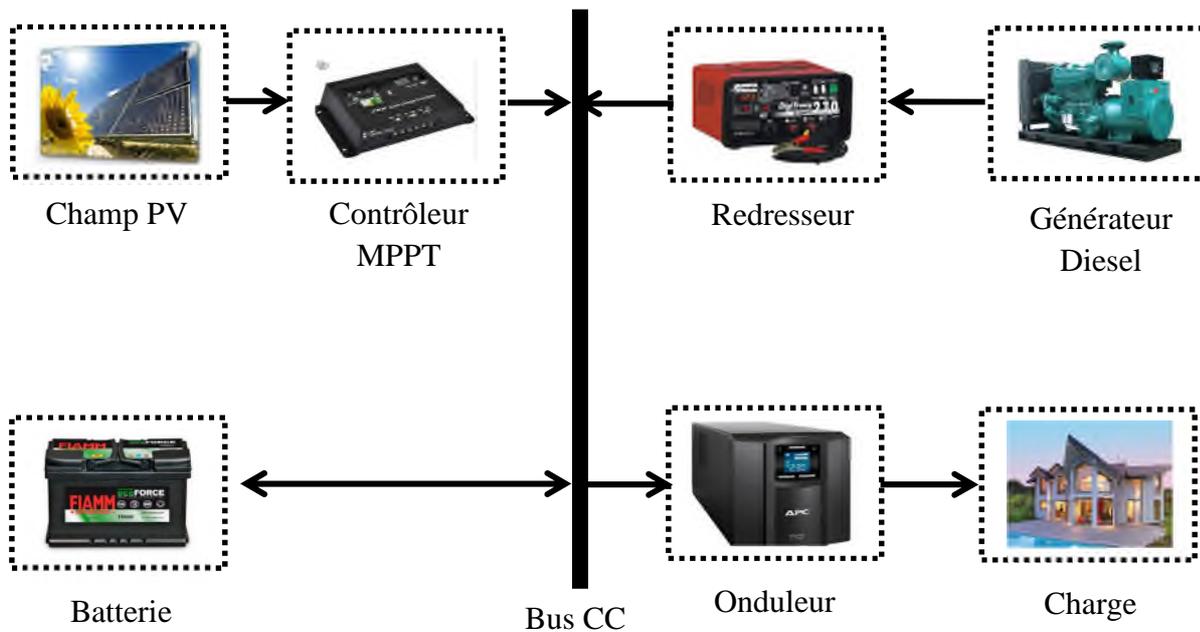


Figure (I.12): Configuration PV/Diesel série

A) Avantages de cette configuration

- ✓ La puissance du générateur diesel peut être optimale lorsqu'il approvisionne la charge et lorsque de plus il charge la batterie;
- ✓ Le système électrique est simplifié par l'absence de changement de la source d'électricité en courant alternatif;
- ✓ La mise en marche du générateur diesel ne provoque pas d'interruption de l'alimentation de la charge.

B) Inconvénients de cette configuration

- ✓ L'onduleur ne peut pas travailler en parallèle avec le générateur diesel, c'est pourquoi il doit être dimensionné pour satisfaire la puissance de pointe de la charge ;
- ✓ La durée de vie de la batterie est diminuée à cause de l'augmentation du nombre des cycles charge – décharge;

- ✓ Le rendement total du système est faible à cause des pertes de conversion dues au fait que le générateur diesel ne peut pas fournir son énergie directement à la charge;
- ✓ La détérioration de l'onduleur provoque l'arrêt complet de l'alimentation.

I.11.1.2 Configuration PV/Diesel commutée

La configuration commutée, présentée sur la figure (I.13), est très fréquemment utilisée malgré ses limitations opérationnelles.

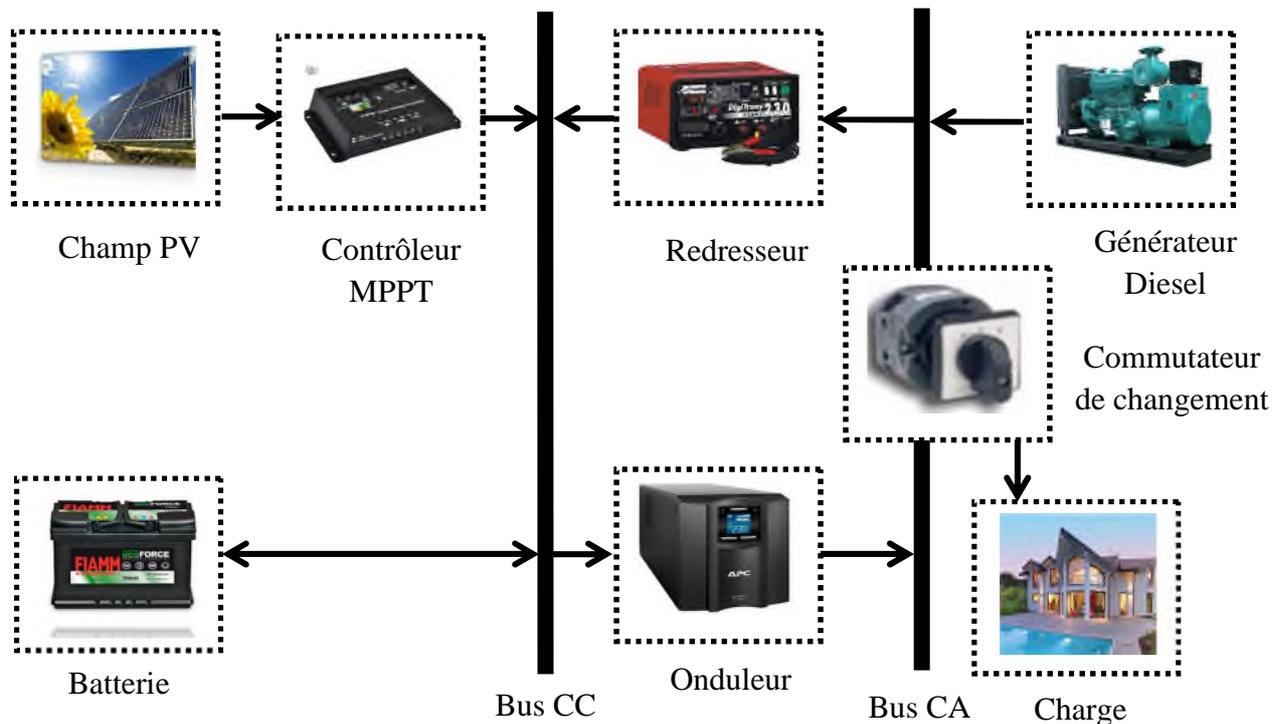


Figure (I.13): Configuration commutée

A) Avantages de cette configuration

- ✓ Le générateur diesel peut fournir l'énergie produite directement à la charge, ce qui augmente le rendement du système et diminue la consommation de carburant;
- ✓ Élimination de la conversion de l'énergie fournie par le générateur d'où élimination des pertes supplémentaires de conversion;
- ✓ La charge peut être alimentée soit par le générateur diesel, soit par l'onduleur alimenté par le système photovoltaïque ou la batterie.

B) Inconvénients

- ✓ Il y a une coupure instantanée, lors de la commutation des sources alternatives;
- ✓ Le générateur et l'onduleur sont dimensionnés pour la puissance de pointe de la charge ce qui réduit leurs rendements en fonctionnement à faible charge;

- ✓ La durée de la transition cause généralement des variations de tension [36].

I.11.1.3 Configuration parallèle

La configuration parallèle est représentée sur la figure (I.14).

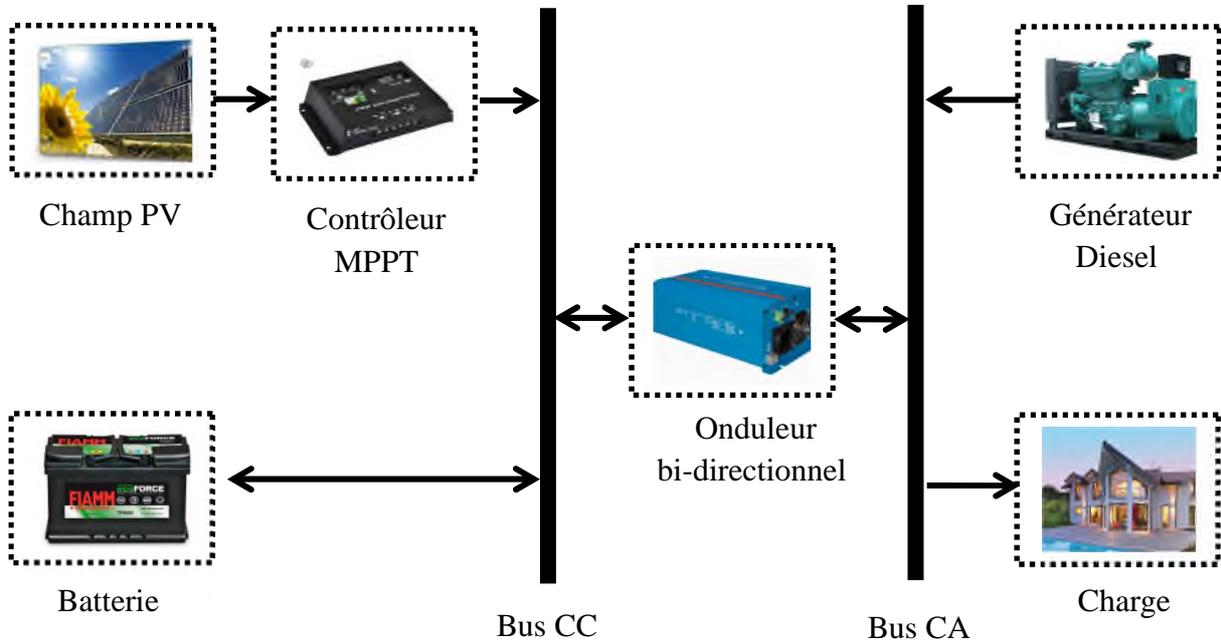


Figure (I.14): Configuration PV/Diesel parallèle

A) Avantages de ce système

- ✓ Le rendement du générateur diesel peut être augmenté;
- ✓ Les puissances nominales des différents éléments peuvent être diminuées par rapport aux puissances nominales dans les autres configurations en alimentant toujours la même charge;
- ✓ L'association du générateur diesel et de l'onduleur permet l'alimentation d'une charge supérieure à la charge alimentée par chaque élément seul.

B) Inconvénients de cette configuration

- ✓ Un contrôle automatique est indispensable pour un bon fonctionnement du système;
- ✓ Les creux de tension et les fortes variations de fréquence entraînent souvent la déconnexion de l'onduleur du système;
- ✓ La gestion du système n'est pas aisée pour une personne non qualifiée [36].

I.12 Intérêt des systèmes hybrides dans les sites isolés

Le coût élevé des investissements nécessaires à l'extension des réseaux publics ainsi que les besoins limités des contrées reculées concernées continueront de faire obstacle à leur raccordement à moyen terme. C'est pourquoi, les systèmes hybrides en site isolé constituent une alternative intéressante. Ces systèmes sont des réseaux électriques autonomes, Ils peuvent par exemple servir à l'approvisionnement électrique d'une île, d'une habitation isolée ou même d'un village entier, un système hybride utilise deux source en même temps ou bien en alternative selon la disponibilité de la ressource renouvelable (le vent, l'ensoleillement, etc.), dont il assure la complémentarité.

I.13 Conclusion

Dans cette partie, on a rappelé quelques notions de base sur l'énergie solaire, cellules photovoltaïques et les différentes technologies utilisées pour la conception de module photovoltaïque. De plus, les différents types de stockage d'énergie par batteries électrochimique ont été traités ainsi que l'intérêt d'un générateur diesel comme source d'appoint dans un système hybride photovoltaïque.

Notre travail porte sur un système hybride PV-Diesel avec stockage, dans l'objectif d'alimenter en énergie électrique une habitation isolée. Les besoins en énergie de l'habitation et la disponibilité de la ressource renouvelable doivent être présent en compte afin de dimensionner notre système, ce qui sera traité dans la partie suivante.

II.1 Introduction

Les installations photovoltaïques autonomes ont pour rôle d'alimenter des récepteurs électriques de façon fiable. Etant donné que la production de cette énergie se repose sur les conditions météorologiques et climatiques son association à une autre source d'énergie, soit renouvelable ou conventionnelle, est une nécessité absolue.

Afin d'assurer la continuité de l'alimentation électrique, l'insertion d'un système de stockage et/ou d'un groupe diesel comme sources d'appoint, devienne une nécessité.

Un système hybride s'avère un bon choix pour les applications qui nécessite une alimentation sans interruption. L'objectif est de dimensionner un système hybride suffisamment fiables afin d'alimenter une habitation isolée, et assurer une bonne gestion d'énergie du système à étudier.

II.2 Définition des besoins énergétiques

La mise en place de l'installation ne se réduit pas au choix du matériel de production et de stockage d'énergie. Il faut aussi choisir le système d'éclairage et les appareils voulus, c'est-à-dire, remplissant les fonctions voulues et respectant les contraintes de consommation imposées par le système. Le choix de lampes et appareils éco-énergétiques (ou à basse consommation), permet de réduire les coûts de l'équipement de génération (panneaux photovoltaïques), et de stockage (batteries).

II.2.1 Inventaire des appareils électriques

Il convient dans un premier temps, d'effectuer un inventaire des équipements consommateurs d'électricité. Ceux-ci sont divers et variés. Nous proposons un inventaire non-exhaustif.

II.2.1.1 Eclairage

L'éclairage est incontournable dans une habitation isolée ou un bâtiment. Au delà de son aspect décoratif et esthétique, l'éclairage permet à l'utilisateur de bénéficier des conditions de luminosité qu'il estime nécessaire à son activité. L'énergie lumineuse est produite par l'intermédiaire d'un système nommé ampoule. Cette ampoule est fixée à un luminaire. L'ampoule mais également le luminaire participe à la performance énergétique de l'éclairage. Sur le marché national, il existe plusieurs types d'ampoules, ainsi que l'utilité de chaque type ou modèle se différent sur le plan économique et esthétique. Les différents types d'ampoules sont représentés dans le tableau (II.1).

Tableau (II.1) : Différents types d'ampoules existants sur le marché [46]

Types d'ampoules	Description	Illustration
Lampe à incandescence à filament	<p>La durée de vie est de l'ordre de 1000 h de fonctionnement.</p> <p>La puissance électrique varie généralement de 30 W à 100 W. Le rendement lumineux est environ de 10 lumens/W.</p>	
Ampoule à incandescence halogène	<p>La durée de vie est de l'ordre de 2000 h à 4000 h de fonctionnement.</p> <p>La puissance varie généralement de 5 W à 100 W pour l'éclairage intérieur et jusqu'à 2 000 W pour l'éclairage extérieur. Le rendement lumineux est entre 15 et 20 lumens/W.</p>	
Ampoule fluorescente compacte	<p>La durée de vie est de l'ordre de 6000 h à 15000 h de fonctionnement.</p> <p>La puissance électrique d'une ampoule fluorescente compacte varie généralement de 1 W à 50 W pour l'éclairage intérieur. Le rendement lumineux est entre 30 et 65 lumens/W.</p>	
Tubes fluorescents	<p>La durée de vie est de l'ordre de 20000 h à 40000 h de fonctionnement..</p> <p>La puissance électrique d'un tube fluorescent varie généralement de 10 W à 60 W. Le rendement lumineux est entre 60 et 70 lumens/W pour les tubes T8, et entre 80 et 90 lumen/W pour les tubes T5.</p>	
Ampoules et Tubes LED (ou Lampe à Diode Electroluminescente)	<p>La durée de vie est plus de 40 000 h de fonctionnement.</p> <p>La puissance électrique des Ampoules et tubes LED varie généralement de 3 W à 30 W. Le rendement lumineux est entre 70 et 100 lumens/W.</p>	

II.2.1.2 Appareils courant à faible consommation

Pour ne pas épuiser le système de stockage, il faut que les appareils soient éco-énergétiques et à basse consommation. Sur le tableau (II.2), on a représenté une liste des appareils courants à faible consommation.

Tableau (II.2) : Appareils courant à faible consommation [46]

Appareil électrique	Puissance électrique	Illustration
Réfrigérateur	Réfrigérateur de classe A+++ Durée du cycle marche : 5 minutes Durée du cycle arrêt : 15 minutes Consommation pendant le cycle marche : 150 W	
Congélateur	Congélateur de classe A+++ Durée du cycle marche : 5 minutes Durée du cycle arrêt : 15 minutes Consommation pendant le cycle marche : 150 W	
Téléphone	Téléphone fixe en mode veille : 2 W Téléphone fixe en utilisation : 10 W Téléphone portable en charge : 5 W	
Téléviseur	La télévision reste allumée en moyenne 5 heures par jour. Télévision allumée : 110 W Télévision en mode veille : 1 W	
Lecteur DVD	Lecteur DVD allumé : 15 W Lecteur DVD en mode veille : 0,5 W	
Ordinateur	L'écran est également un gros poste consommateur d'électricité. Ordinateur pour les jeux-vidéo : 600 W Ordinateur de bureau : 90 W Ordinateur en veille (écran éteint) :10W	
Ventilateur	Petit ventilateur : 50 W Plafonnier/Ventilateur industriel : 90 W	

II.2.1.3 Equipements courants à forte puissance électrique

Dans une habitation isolée, l'utilisation des équipements à forte puissance électrique, est largement demandée, pour satisfaire le besoin au terme de chauffage, nettoyage, cuisiné, etc. Le tableau (II.3) montre quelques appareils à forte puissance couramment utilisés:

Tableau (II.3) : Appareils courant à forte puissance électrique [46]

Appareil électrique	Puissance électrique	illustration
Cuisinière électrique	1 plaque électrique à résistance : de 2 600 W à 3 400 W 1 plaque électrique à induction : de 1 800 W à 2 400 W On privilégiera un appareil de cuisson fonctionnant au gaz.	
Four électrique	Petit four électrique à résistance : 1 500 W Gros four à résistance : 5 000 W Four électrique micro-ondes : 1 000 W On privilégiera un four fonctionnant au gaz.	
Aspirateur	Petit aspirateur : 650 W Gros aspirateur : 2 000 W	
Fer à repasser	Petit fer à repasser : 750 W Gros fer à repasser : 1 500 W	
Machine à laver	Machine à laver d'une capacité de 5 kg : 2 000 W Machine à laver d'une capacité de 10 kg : 3 000 W	
Sèche-cheveux	Entre 1 000 W et 2 000 W	
Climatisation individuelle	Entre 1 000 W et 2 000 W	
Chauffe-eau électrique	Entre 500 W et 2 000 W On privilégiera un chauffage thermique (bois, gaz, fioul ou solaire thermique).	

II.3- Bilan de puissance et d'énergie journalier (consommation journalière)

Le besoin énergétique journalier de notre habitation, est la quantité d'énergie nécessaire chaque jour pour alimenter les charges. Il s'exprime en Watts-heures et Ampères-heures. Le besoin énergétiques est donné sur le tableau (II.4) pour l'hiver, et le tableau (II.5) pour l'été.

II.3.1 Tableau de la consommation journalière (Hiver)

L'estimation de l'énergie journalière consommée par l'éclairage et les différents appareils durant la saison hivernale, est représentée dans le tableau (II.4).

Tableau (II.4) : Consommation journalière en (Hiver)

/	Pièce ou Appareil électrique	P(W)	Temps de fonctionnement (h)	Energie (Wh/jour)
Eclairage	Chambre adulte	40	5	200
	Chambre enfant 1	36	4	144
	Chambre enfant 2	36	4	144
	Salle de bain	18	2	36
	Sanitaire WC	18	1	18
	cuisine	18	4	72
	couloir	36	2	72
	Salle de séjour	54	6	324
Appareils	Frigo	150	En continue	900
	Téléviseur 1	80	8	640
	Four micro-onde	1000	15mn/jour	250
	Micro-ordinateur	80	5	400
	Machine à laver	2000	4 lavages/semaine	474
	Divers	150	3	450
Totaux	/	3816	/	4124

II.3.2 Tableau de la consommation journalière (été)

L'estimation de l'énergie journalière consommée pour la saison estivale est plus importante que la saison hivernale, vu l'augmentation conséquente de nombre d'heures de fonctionnement de certains Appareils utilisés, de plus l'utilisation de climatiseur a un grand effet sur la consommation, comme est montré dans le tableau (II.5).

Tableau (II.5) : Consommation journalière en (été)

/	Pièce ou Appareil électrique	P(W)	Temps de fonctionnement (h/j)	Energie (Wh/jour)
Eclairage	Chambre adulte	40	3	120
	Chambre enfant 1	36	3	108
	Chambre enfant 2	36	3	108
	Salle de bain	18	2	36
	Sanitaire WC	18	1	18
	cuisine	18	4	72
	couloir	36	2	72
	Salle de séjour	54	5	270
Appareils	Frigo	150	En continue	900
	climatiseur	1300	90mn/jour	1950
	Téléviseur	80	9	720
	Four micro-onde	1000	15mn/jour	250
	Micro-ordinateur	80	5	400
	Machine à laver	2000	4 lavages/semaine	474
	Divers	155	1	155
Totaux	/	5116	/	5653

II.4 Dimensionnement du système

II.4.1 Dimensionnement du champ photovoltaïque

II.4.1.1 Evaluation du gisement solaire

Comme pour toutes les applications de l'énergie solaire, une bonne connaissance du gisement solaire est nécessaire à l'étude et au dimensionnement de système photovoltaïque. L'Algérie est connue pour son gisement important, classé parmi les trois meilleurs gisements dans le monde, le photovoltaïque s'avère avantageux et bénéfique à notre installation puisque notre site d'étude est couvert par ce gisement meilleur.

II.4.1.1 Localisation

Notre habitation est située, au nord est de l'Algérie, dans la ville de Bejaia à proximité de l'aéroport de Bejaia-Soummam, Abane Ramdane.

Coordonnées du site :

- ✓ Latitude: $36,72^0$ Nord ;
- ✓ Longitude: $5,07^0$ est ;
- ✓ Altitude: 2m ;

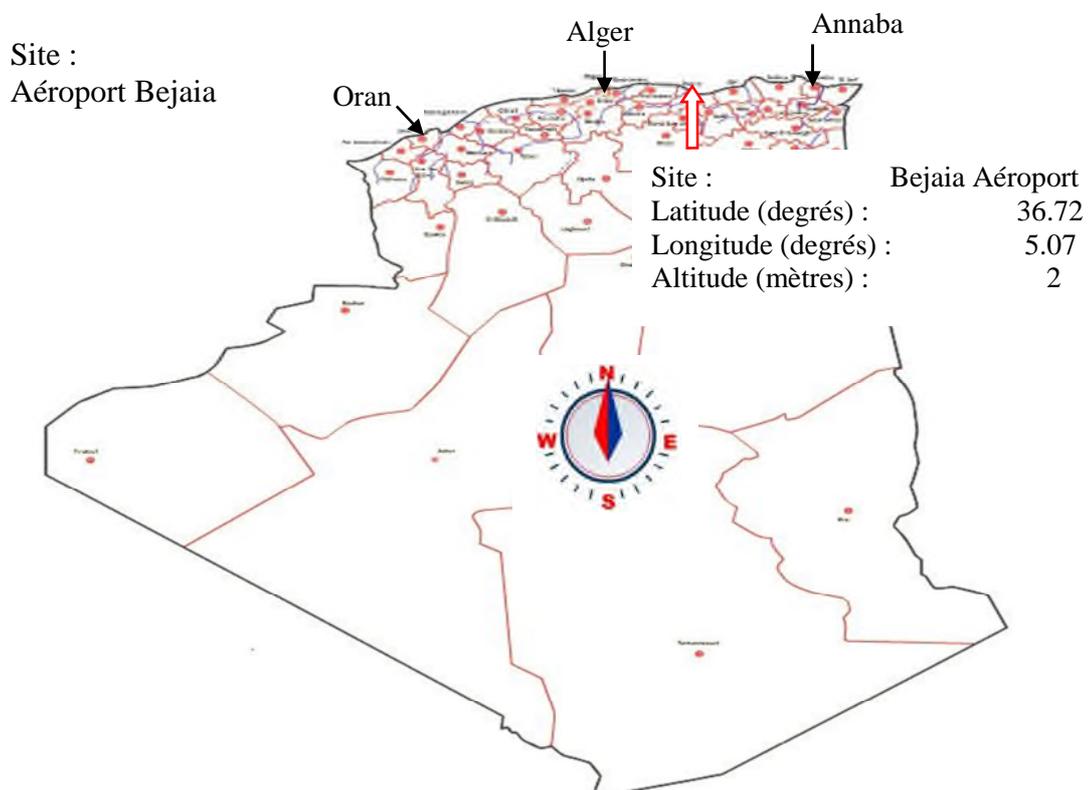


Figure (II.1) : Localisation géographique du site en étude



Figure (II.2) : Image satellite du site en étude

II.4.1.2 Angle d'inclinaison et orientation des panneaux

Pour que l'absorption du rayonnement solaire soit optimale, il faut que les rayons incidents frappent le panneau à angle droit. Le positionnement des panneaux est crucial. Il dépend à la fois de la latitude et des conditions météorologiques du site. Au sud de l'équateur, le soleil se trouve dans la partie nord du ciel, les panneaux doivent être tournés vers le nord alors que, au nord de l'équateur, le soleil se trouvant dans la partie sud du ciel, les panneaux doivent être tournés vers le sud.

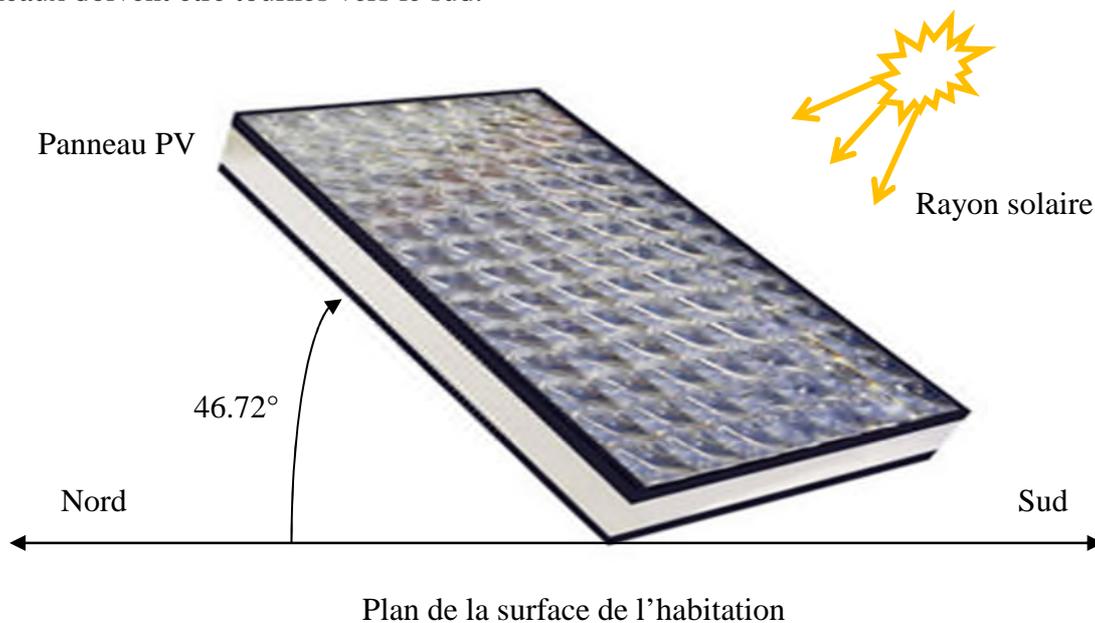


Figure (II.3) : Inclinaison et orientation des panneaux photovoltaïques

On peut adopter une règle simple, selon laquelle les panneaux doivent être tournés vers l'équateur, et inclinés selon un angle égale à la latitude du site plus 10° .

Pour le cas de notre étude, l'habitation est située au nord de l'Algérie exactement dans la ville de Bejaia, d'une latitude de 36.72° , ce qui va engendrer une inclinaison des panneaux suivant la règle précédente soit une valeur, de 46.72° avec une orientation vers le sud étant donné que l'Algérie se situe dans l'hémisphère nord.

II.4.1.3 Gisement solaire mensuelle

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaire les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara).

La figure (II.4), représente : Moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue sur une surface horizontale en Algérie (insolation en Wh/m^2), on remarque que la partie sud est caractérisée par des valeurs d'insolations importantes [39].

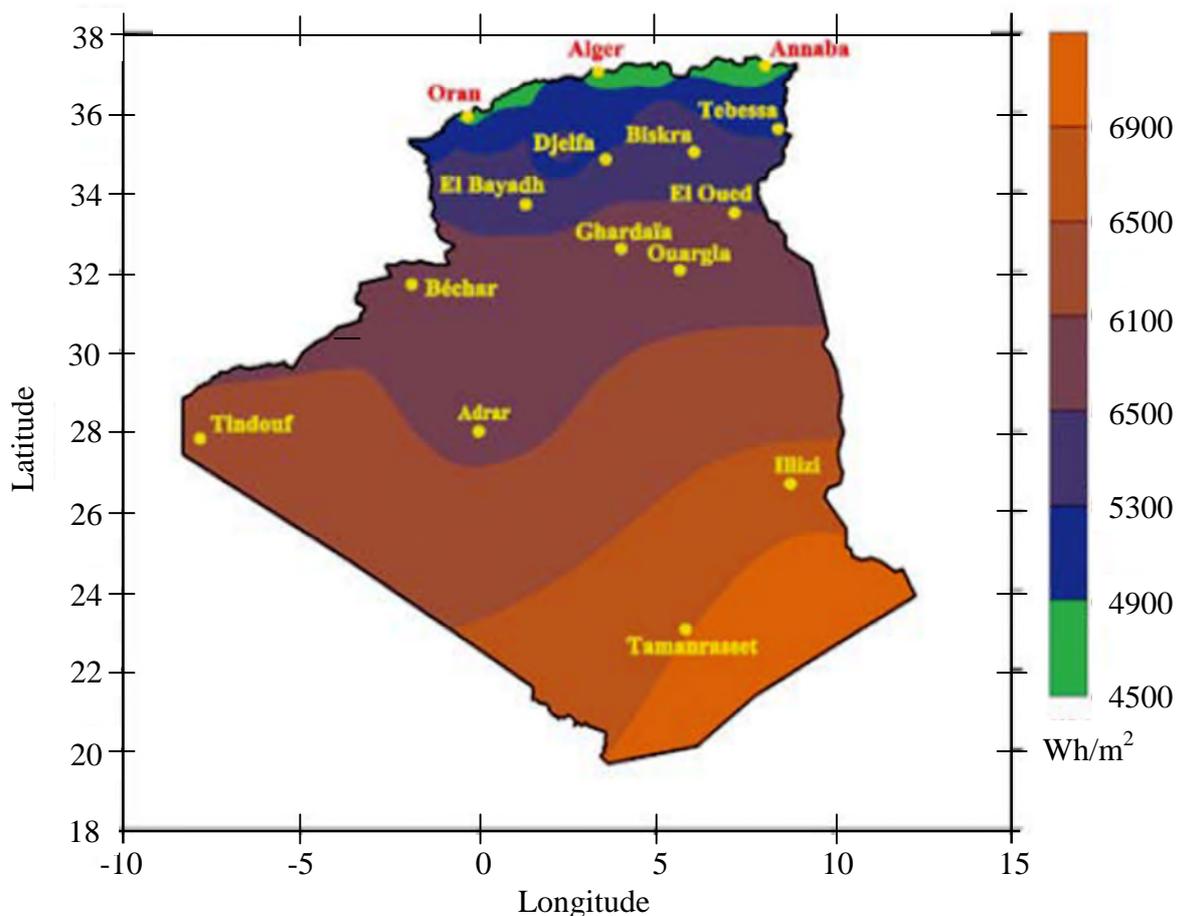


Figure (II.4) : Moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue sur une surface horizontale en Algérie (insolation en Wh/m^2)

Le tableau (II.6) montre l'irradiation globale moyenne mensuelle sur un plan incliné de 45° à Bejaïa.

Tableau (II.6): Irradiation globale moyenne mensuelle sur un plan incliné de 45° à Bejaïa

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
E_{mes} (kWh/(j.m ²))	2.4	3.1	3.6	5.3	5.7	6.7	6.9	6.2	4.9	3.8	2.6	2.3

L'irradiation solaire globale est mesurée à l'aide d'un capteur actinométrique particulier, le Pyranomètre. Ce dernier contient une thermopile qui délivre une tension proportionnelle à l'irradiation.

La partie supérieure de la pile s'échauffe lorsqu'elle est exposée au rayonnement solaire, tandis que la partie inférieure est protégée du rayonnement et sert de référence.

A l'aide de cette technologie, le service technique de l'aéroport de Bejaïa on peut mesurer l'irradiation globale moyenne mensuelle sur un plan incliné de 45°, les valeurs sont représentées à l'aide d'un d'histogramme à quatre saisons sur la figure (II.7).

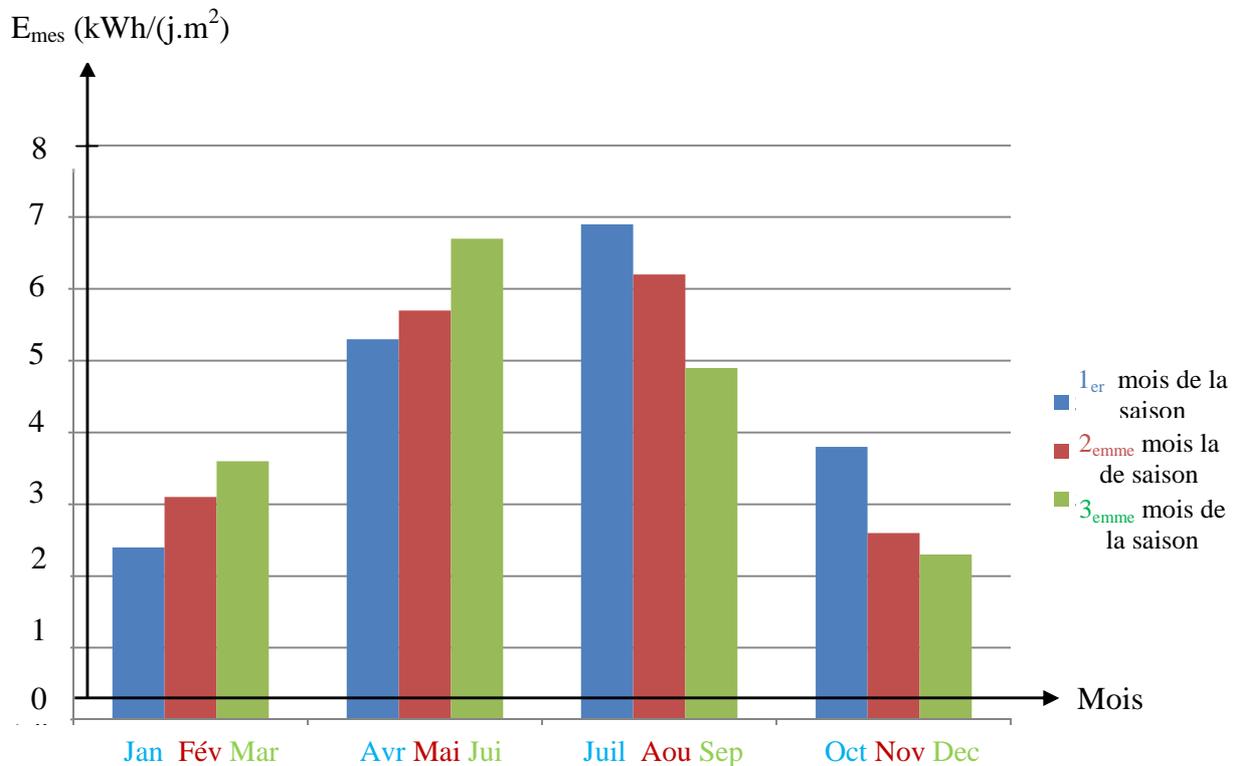


Figure (II.5) : Représentation graphique Irradiation globale moyenne mensuelle sur un plan incliné de 45° à Bejaïa

II.5 Calcul de la puissance crête du champ PV

Etant donné que l'ensoleillement change d'un mois à l'autre, la puissance crête de notre champ photovoltaïque varie durant les mois de l'année comme le montre le tableau (II.7), et le calcul de cette puissance est donné par la relation (II.1) :

$$P_c \geq \frac{E_{bes} \times E_{stc}}{E_{mes} \times C_p} \quad (II.1)$$

Avec :

P_c : Puissance crête du champ photovoltaïque (W) ;

E_{bes} : Besoin journalier (Wh/j) ;

E_{stc} : Ensoleillement dans les conditions STC ($E_{stc} = 1000 \text{ W/m}^2$) ;

E_{mes} : Ensoleillement du site d'installation (kWh/j. m^2) ;

C_p : Facteur de correction appliqué pour tenir compte des différentes pertes ($C_p = 0.7$).

Tableau (II.7) : Puissance crête mensuelle produite par le champ photovoltaïque

Mois	Jan	Fév.	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sept	Oct	Nov	Dec
P_c (kWc)	3.365	2.605	2.243	1.524	1.417	1.205	1.170	1.302	1.302	2.125	3.106	3.511

A partir du tableau (II.7), et avec les résultats de calcul de la puissance crête du champ photovoltaïque pour chaque mois de l'année, on a opté pour le choix d'une puissance crête $P_c = 2.2 \text{ kW}$. Cette puissance assure une couverture en énergie électrique pendant huit mois à notre habitation par le champ photovoltaïque seul soit environ 67 % de l'année. Pendant les quatre mois restant 33 % de l'année, la puissance de système PV choisi est insuffisante pour couvrir le besoin énergétique

II.6 Envisagé le groupe électrogène

Dans une installation hybride PV/Diesel, les batteries ne doivent pas risquer d'être endommagées par une décharge profonde, provoquée par une surconsommation de la charge. A cet effet, l'intégration de groupe électrogène est d'une importance capitale à notre système hybride, il permet une diminution considérable du nombre de panneaux utilisés et aussi de l'investissement initial.

Le groupe électrogène, figure (II.6), est généralement dimensionné pour couvrir le pic de consommation. Dans notre cas, si tous les appareils sont allumés au même temps, la puissance totale atteint 5 kW. Par conséquent, on choisit un générateur diesel d'une puissance de 5 kW.



Figure (II.6) : Groupe électrogène

Pour un système PV d'une puissance $P_c = 2200 \text{ W}_c$, nous faisons un calcul d'évaluation de la production d'énergie fournie par notre champ PV, en calculant à base de la relation (II.2), l'énergie électrique produite mensuelle et fournie à la charge, ainsi que le déficit d'énergie ΔE , dont l'objectif est de savoir quand est-ce que le champ PV satisfait la demande d'énergie, et les mois où la source de secours intervient pour assurer le déficit d'énergie.

$$E_{\text{éle}} = \frac{P_c}{P_{\text{stc}}} \times E_{\text{mes}} \times C_p \tag{II.2}$$

Où :

$E_{\text{éle}}$: Énergie électrique mensuelle fournie par le champ photovoltaïque (kWh/jour).

$$\Delta E = E_{\text{bes}} - E_{\text{éle}} \tag{II.3}$$

Avec :

ΔE : Déficit d'énergie fournie par le GD (+), ou le surplus fournie par le champ PV (-) ;

E_{bes} : Besoin journalier (kWh/jour).

Les résultats de calculs sont représentés sur le tableau (II.8).

Tableau (II.8) : Énergie produite mensuelle par le champ et déficit d'énergie couvert par le groupe diesel

Mois	Jan	Fév.	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sept	Oct	Nov	Dec
$E_{\text{éle}}$ (kWh/j)	3.696	4.774	5.544	8.162	8.778	10.318	10.626	9.548	7.546	5.852	4.004	3.542
ΔE (kWh/j)	1.957	0.879	0.109	-2.509	-3.125	-4.665	-4.973	-3.895	-1.893	-1.199	1.649	2.111

II.7 Choix des modules

Selon la puissance totale demandée par les charges ainsi que le type de notre installation (non raccordée au réseau), nous avons opté pour des modules photovoltaïques d'une puissance de 95 W_c chacun.

II.7.1 Détermination du nombre de module

La plupart de temps, un seul panneau ne suffit pas pour fournir la puissance voulue, il faut donc en prévoir plusieurs, qui seront groupés en champs (figure II.7).



Figure (II.7) : Champ photovoltaïque alimentant une habitation isolée

Un réfrigérateur dans notre habitation exige une puissance correspond à un panneau de 150 W_c, et pour le cas de notre installation le nombre de panneaux photovoltaïques est calculé par la relation (II.4):

$$N_{pv} \geq \frac{P_c(W)}{P_{pv\text{unitaire}} (W)} \quad (\text{II.4})$$

Avec :

N_{pv} : Nombre de panneau ;

P_c : Puissance totale de champs photovoltaïque ;

$P_{pv\text{unitaire}}$: Puissance d'un module photovoltaïque.

Application numérique :

$$N_{pv} \geq \frac{2200}{95} = 23.16$$

Donc, on opte pour un nombre $N_{pv} = 24$ panneaux, la puissance crête du champ sera donc :

$$P_c = 24 \times 95 = 2280 \text{ W}$$

Avec deux modules de 95W branché en série, la tension à circuit ouvert est de 45Volt, comme le montre la figure (II.6).

$$P_c = 95 \text{ Watt}$$

$$V_{oc} = 22.5 \text{ V}$$

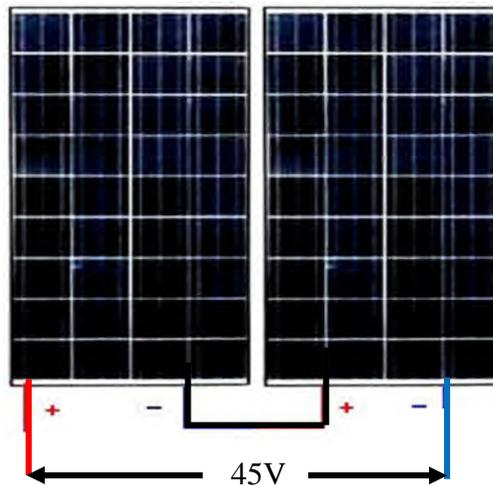


Figure (II.8) : Montage deux (2) Panneaux photovoltaïques relier en série

Après la réalisation des couples panneaux en série, le branchement en parallèle se fait comme le montre la figure (II.9) :

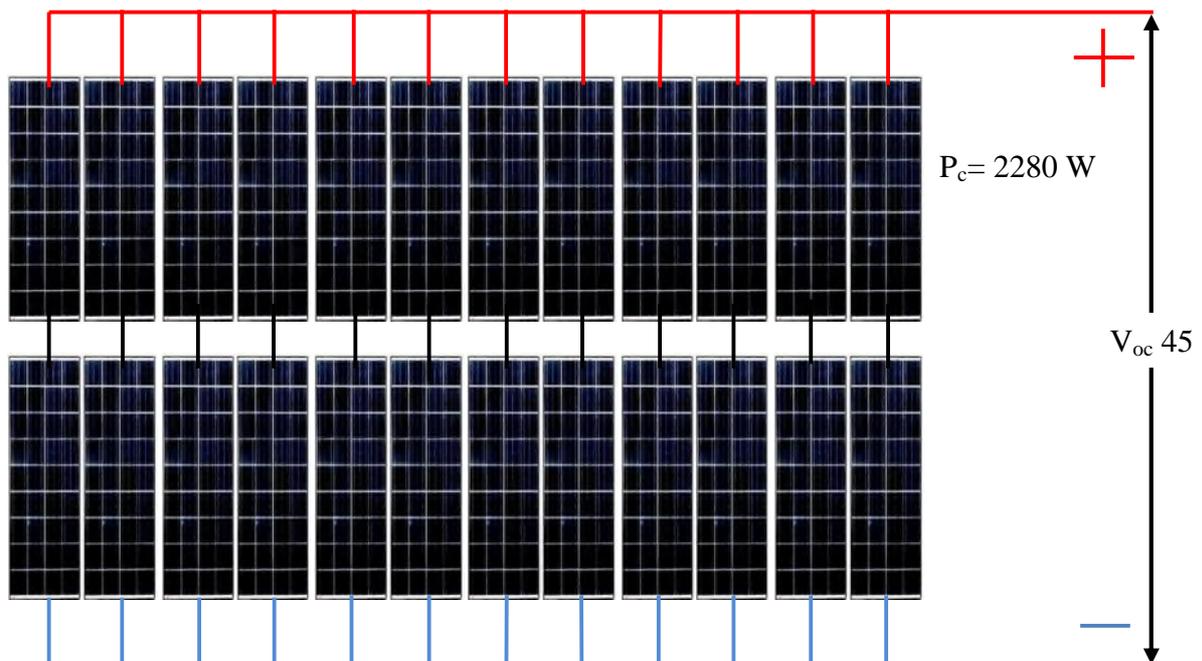


Figure (II.9) : Montage panneaux photovoltaïques en parallèle

II.8 Dimensionnement du parc de batteries

Le stockage d'énergie, joue un rôle important dans un système d'énergie hybride en site isolé. Dans la plupart des cas, les batteries représentent encore la technologie la plus rentable. Elles sont d'habitude de types plomb-acide, ce qui est le cas dans notre installation.

II.8.1 Choix de la tension et calcul de la capacité

Nous choisissons des batteries plomb-acide d'une tension de 12V chacune. Sachant que dans le cas de notre système c'est les batteries de stockage qui impose la tension au champ PV. La batterie utilisée dans le cas de notre installation est représentée sur la figure (II.11).

Pour le cas de notre habitation, nous désirons avoir une autonomie de 7 jours. La capacité de champ de batteries standard est donnée par la relation (II.5), [40]:

$$C_B = \frac{B_j \times J_{Auto}}{V_B \times PMD \times K_B} \quad (II.5)$$

Avec:

C_B : Capacité total des batteries (Ah) ;

B_j : Besoin journalier (Wh/j) ;

J_{Auto} : Nombre de jour d'autonomie ;

V_B : Tension de la batterie (V) ;

PMD: Profondeur maximale de décharge (80%) ;

K_B : Coefficient de température de la batterie (0.85).

Application numérique :

$$C_B = \frac{5653 \times 7}{48 \times 0.8 \times 0.85} = 1212 \text{ Ah}$$



Figure (II.10) : Batterie Plomb-Acide

Nombre de batteries, est de quatre branché en série ce qui fait-on garde la même capacité de $C_{\text{Batt}} = 1212 \text{ Ah}$, est assure une tension de $V_{\text{oc}} = 48\text{V}$.

Le montage des batteries est représenté sur la figure (II.12) :



Figure (II.11) : Schéma de montage de champ de batteries Acide-Plomb

II.8.2 Utilisation et bon fonctionnement

L'emploi des batteries plomb-acide est sujet à des contraintes qu'il est nécessaire de respecter pour garantir son bon fonctionnement et sa longévité. Elles ne peuvent rester longtemps inutilisées sans conséquences néfastes sur leur durée de vie. Les cycles répétés de charge/décharge aléatoires doivent être évités. Leur état de charge ne doit pas atteindre de valeurs extrêmes pour éviter toute dégradation prématurée [8].

Ce système de stockage a pour rôle d'alimenter la charge pour une durée relativement longue (des heures ou même des jours) [19].

II.9 Conclusion

Dans ce chapitre, on a dimensionné les différents éléments qui constituent notre système hybride PV/Diesel avec batteries de stockages électrochimiques. On a étudié la chaîne de conversion d'énergie (continue/alternative) et procédé au choix du module à utiliser ainsi que la puissance du groupe électrogène nécessaire comme source de secours.

L'objectif est de limiter l'intervention du groupe électrogène dans les mois les plus défavorables, à cet effet nous avons dimensionné un système de stockage efficace pour parvenir à cet inconvénient.

L'optimisation de l'énergie produite par le panneau, impose la mise en place d'un régulateur MPPT, pour maximiser et lui imposé de fonctionner à sa puissance maximale. La modélisation du système hybride PV/Diesel, est l'objectif du chapitre suivant.

III.1 Introduction

La modélisation d'un système physique donné, consiste à établir son modèle mathématique, afin de le simuler sous un logiciel mathématique (dans notre cas Matlab/Simulink/SimPowerSystem), comprendre son fonctionnement et faciliter son dimensionnement.

Les modélisations obtenues doivent être à la fois précises pour prendre compte des transferts énergétiques et suffisamment rapides pour permettre des simulations sur une longue période avec un temps de calcul raisonnable.

L'objectif est de disposer de modèles suffisamment fiable, afin d'effectuer une étude d'optimisation du dimensionnement et de la gestion d'énergie du système complet.

III.2 Schéma global du système

La configuration la plus favorable pour le cas de notre habitation est bien parallèle, vu ces avantages au terme de transit de puissance.

L'association du groupe diesel et le champ PV permet l'alimentation d'une charge supérieure à la charge alimentée par chaque élément seul ainsi, dans le cas de cette configuration, le rendement de générateur diesel peut être augmenté. De plus, les puissances nominales des différents éléments peuvent être diminuées par rapport aux puissances nominales dans les autres configurations, en alimentant toujours la même charge [37].

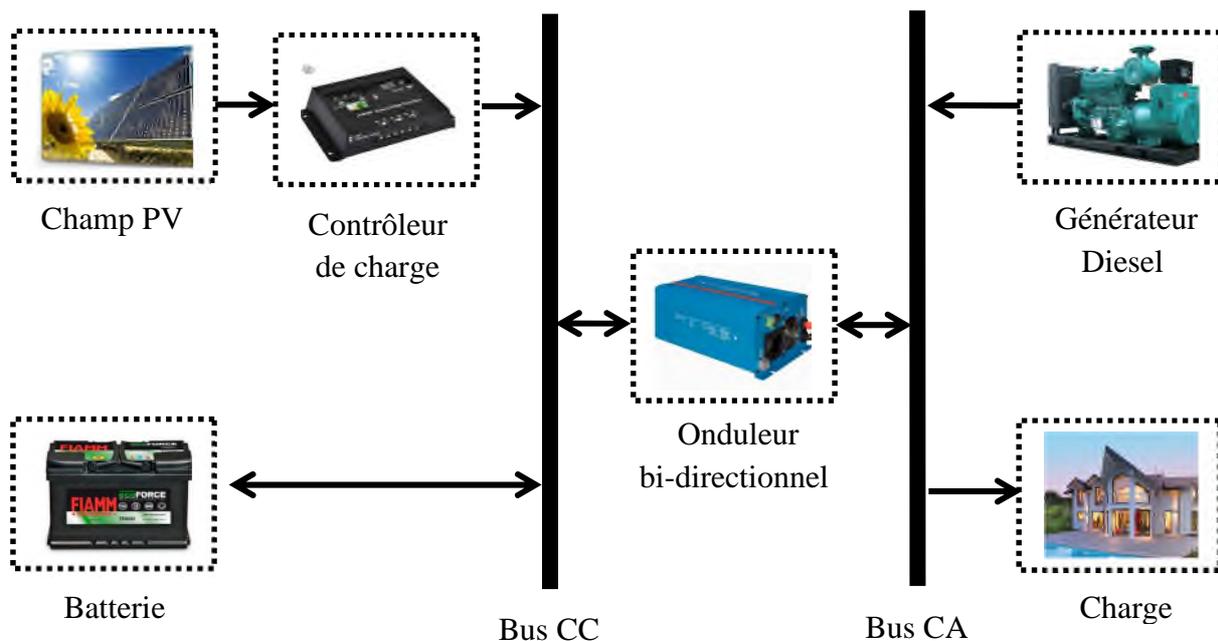


Figure (III.1) : Installation type du système étudié PV/Diesel parallèle

III.3 Modélisation du générateur PV

Le tableau (III.1) montre les paramètres du module photovoltaïque 95W_c CEEG monocristallin choisi pour notre étude.

Tableau (III.1) : Paramètres du module photovoltaïque utilisés aux conditions STC [47]

Paramètres	Valeurs
Puissance maximale du panneau P _{mpp}	95 W _c
Courant au point de puissance maximale I _{mpp}	5.21 A
Tension au point de puissance maximale V _{mpp}	18.3 V
Courant de court-circuit I _{sc}	5.56 A
Tension de circuit ouvert V _{oc}	22.5 V
Rendement pratique du module	17.05%
Coefficient d'influence de la température sur le courant K _i	+0.0039 A/K
Coefficient d'influence de la température sur la tension K _v	-0.307 V/K
Coefficient d'influence de la température sur la puissance	-0.423 W/K
Facteur d'idéalité α	1.3
Nombre de cellules en série N _s	36
Résistance série R _s	0.158 Ohm
Résistance parallèle R _{sh}	450.5 Ohm

III.3.1 Caractéristiques du module photovoltaïque

La modélisation mathématique du Module nous permet d'obtenir les différentes caractéristiques qui montrent l'influence de l'irradiation et de la température sur le courant, la tension et la puissance du module.

III.3.1.1 Influence de l'irradiation

En variant l'irradiation, les courbes de ($I_{pv} = f(V_{pv})$) et de ($P_{pv} = f(V_{pv})$) du module PV pour une température constante ($T = 25^{\circ}\text{C}$) sont représentées respectivement sur les figures (III.2) et (III.3).

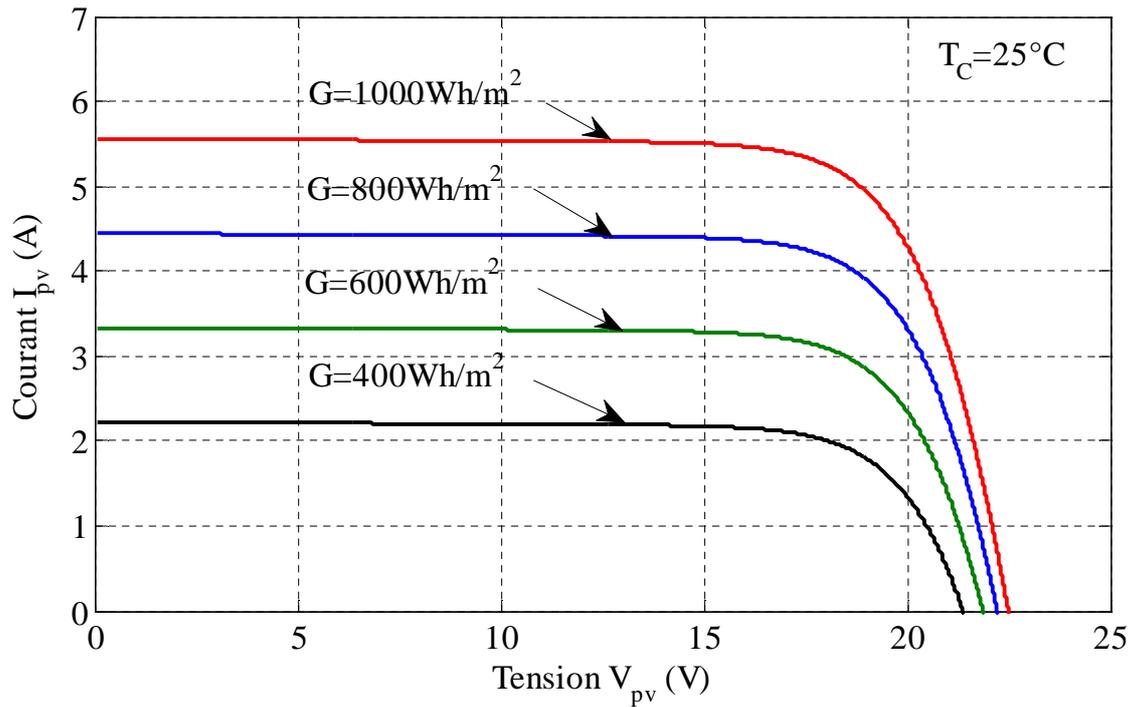


Figure (III.2) : Caractéristique I-V d'un module PV selon l'irradiation à $T_C = 25^\circ\text{C}$

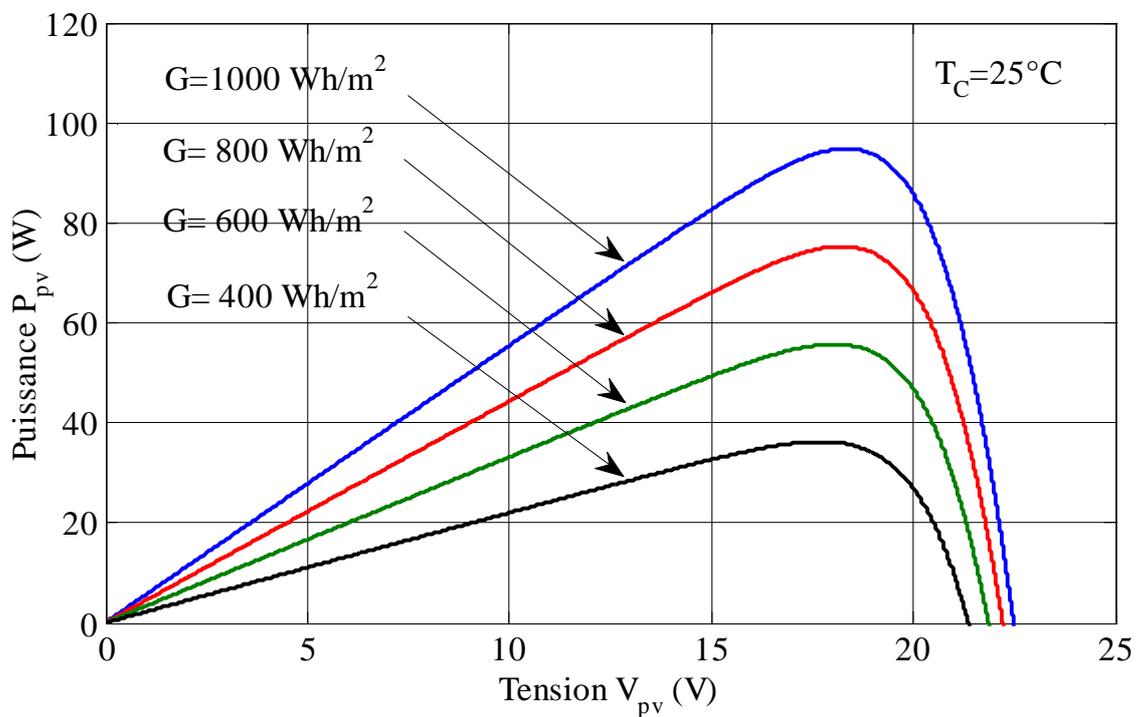


Figure (III.3) : Caractéristique P-V d'un module PV selon l'irradiation à $T_C = 25^\circ\text{C}$

On remarque que le courant de court-circuit varie en fonction de la variation de l'irradiation et que la tension en circuit ouvert varie très peu.

III.3.1.1 Influence de la température

En faisant varier la température entre 25°C et 55°C, les caractéristiques ($I_{pv}=f(V_{pv})$) et ($P_{pv}=f(V_{pv})$) du module PV sont données par les figures (III.4) et (III.5) respectivement.

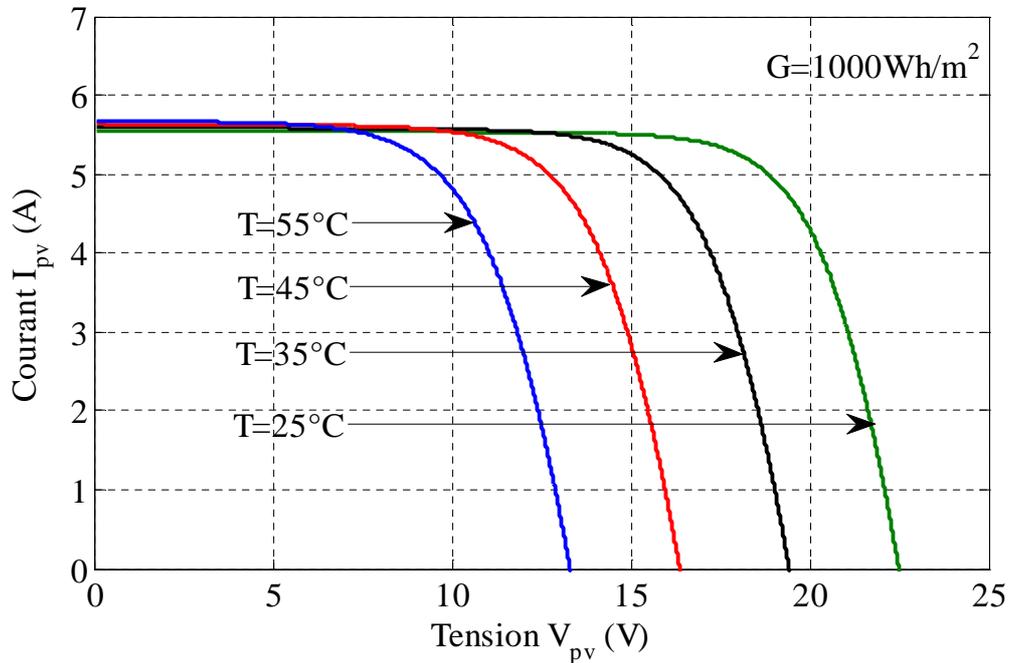


Figure (III.4) : Caractéristique I-V d'un module PV selon la température à $G=1000\text{Wh/m}^2$

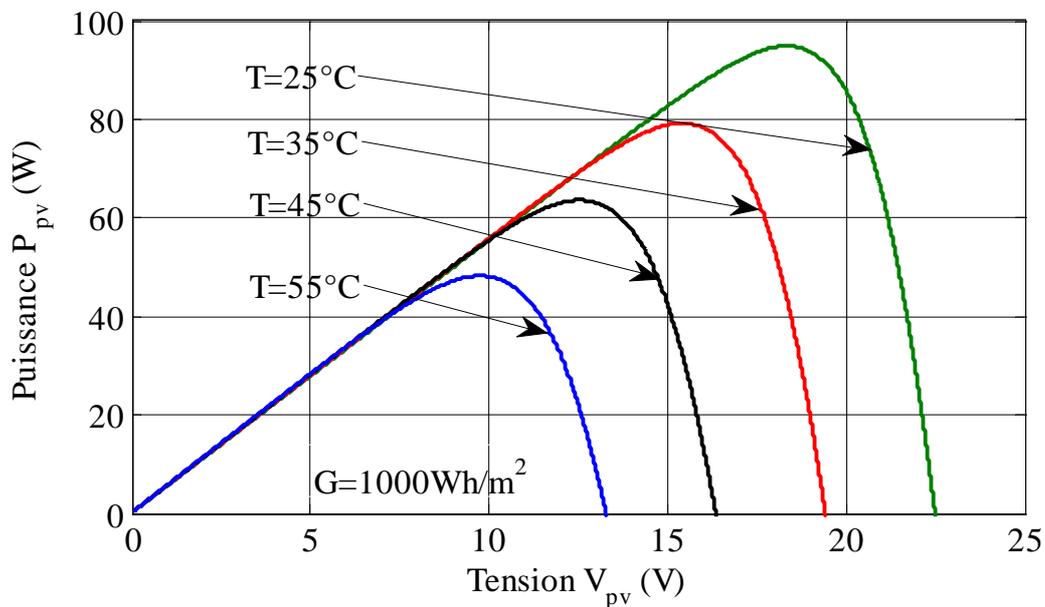


Figure (III.5) : Caractéristique P-V d'un module PV selon la température à $G=1000\text{Wh/m}^2$

III.3.2 Caractéristiques du champ photovoltaïque

Les puissances demandées par les charges couramment utilisées nécessitent conjointement des tensions supérieures à celle que peuvent fournir les modules photovoltaïques, il faut donc envisager des groupements. Pour cela les modules sont assemblés pour donner un champ photovoltaïque.

III.3.2.1 Influence de l'irradiation

En faisant varier l'irradiation entre 400 Wh/m^2 et 1000 Wh/m^2 avec un pas de 200, les caractéristiques ($I_{pv}=f(V_{pv})$) et ($P_{pv}=f(V_{pv})$) du champ PV sont données par les figures (III.6) et (III.7) respectivement. On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible irradiation.

L'irradiation standard, internationalement acceptée, pour mesurer la réponse des modules PV est une intensité rayonnante de 1000 Wh/m^2 est une température de 25°C .

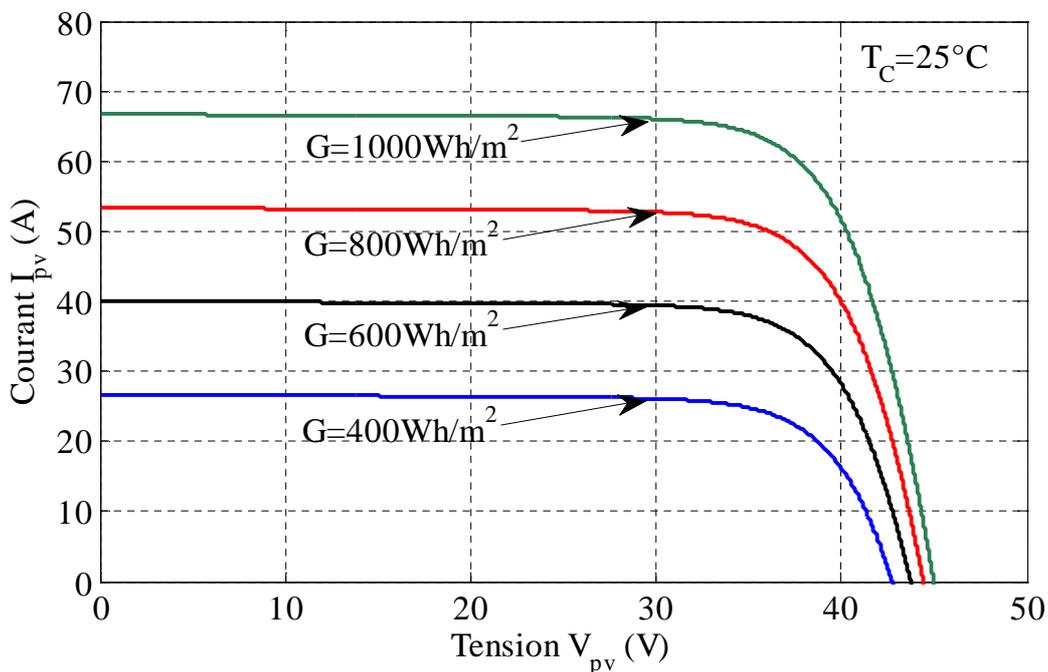
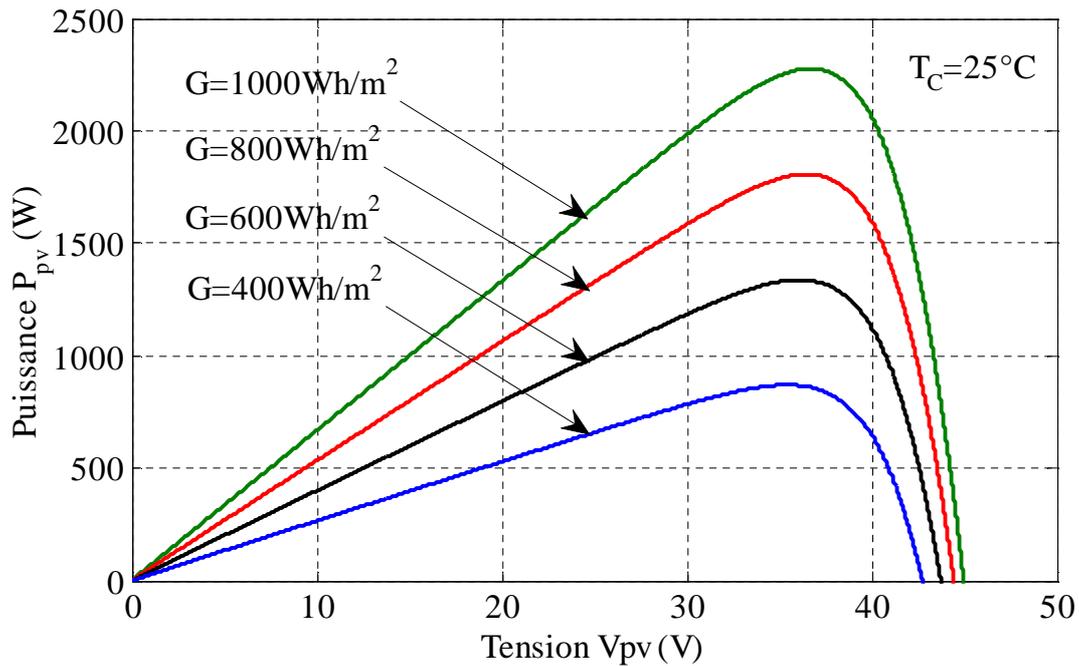


Figure (III.6) : Caractéristique I-V du champ PV selon l'irradiation à $T_c = 25^\circ\text{C}$



(III.7) : Caractéristique P-V du champ PV selon l'irradiation à $T_C = 25^\circ\text{C}$

III.3.2.2 Influence de la température

En faisant varier la température entre 25°C et 55°C , les caractéristiques ($I_{pv}=f(V_{pv})$) et ($P_{pv}=f(V_{pv})$) du champ PV sont données par les figures (III.2) et (III.3) respectivement. On remarque que la température a une influence négligeable sur le courant de court-circuit mais la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente.

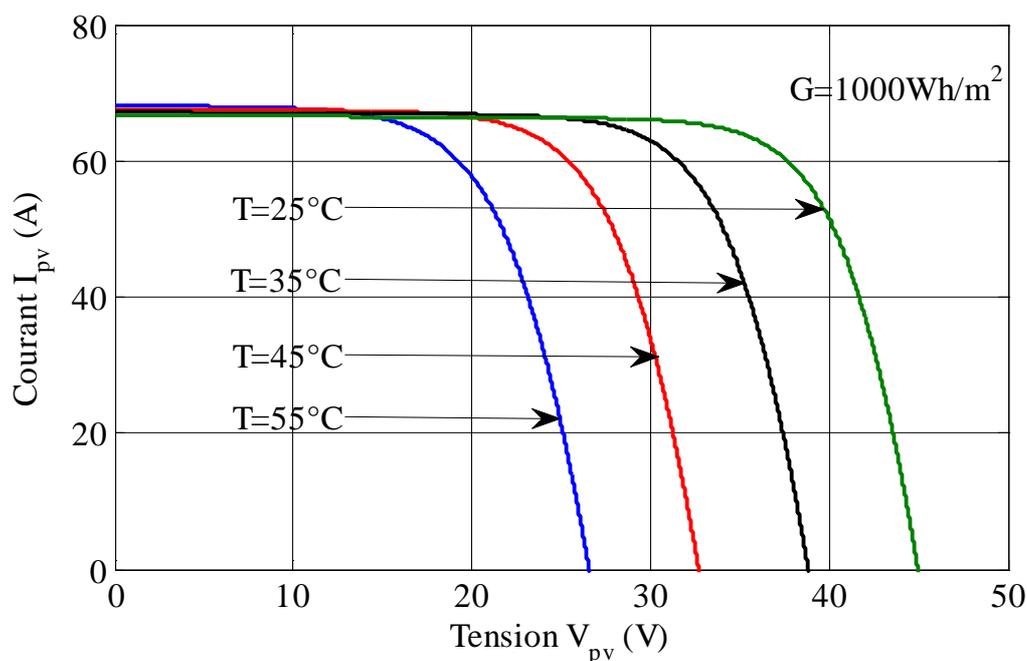


Figure (III.8) : Caractéristique I-V du champ PV selon la température à $G = 1000 \text{ Wh/m}^2$

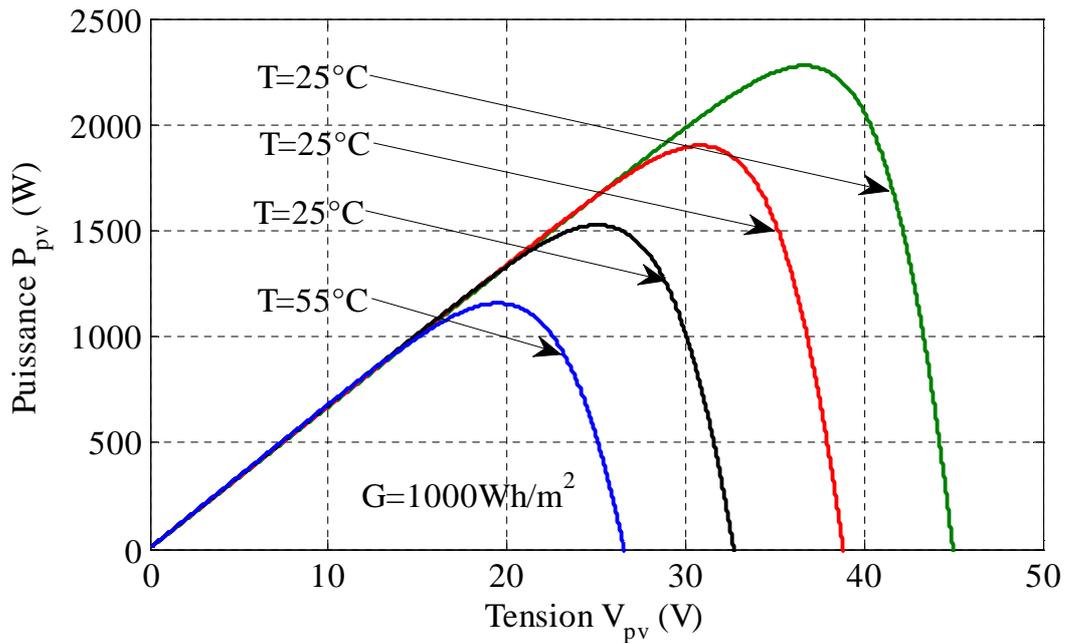


Figure (III.9) : Caractéristique P-V du champ PV selon la température à $G=1000\text{Wh/m}^2$

III.4 Modélisation du hacheur élévateur

III.4.1 Model mathématique du hacheur

Pour une bonne exploitation de l'énergie produite par les panneaux ou fournie par les batteries de stockage, le convertisseur (DC/DC) est l'élément clé pour avoir un rendement énergétique intéressant. Le hacheur (élévateur), présente par ses caractéristiques une solution efficace pour extraire le maximum de puissance et pouvoir augmenter la tension à la sortie pour ensuite la convertir en alternative par un convertisseur (DC/AC) [41].

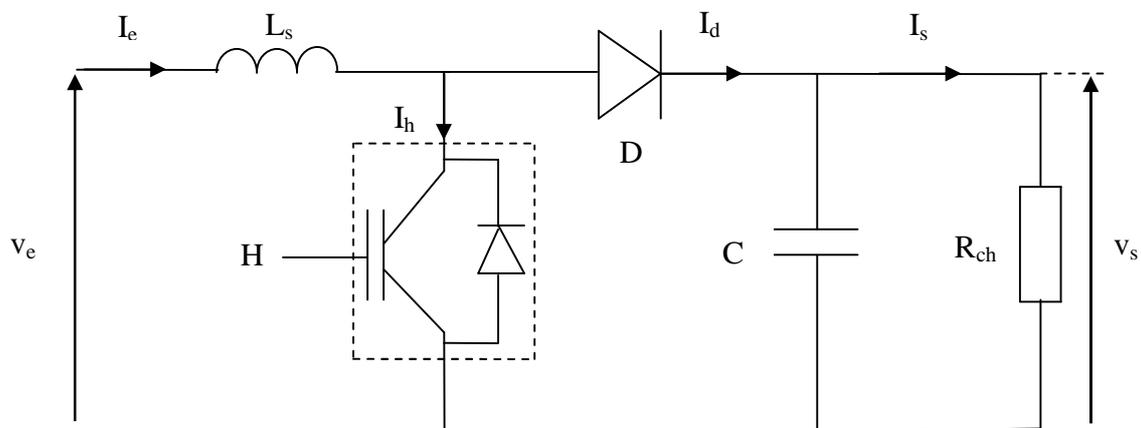


Figure (III.10) : Circuit électrique d'un hacheur élévateur

III.4.2 Equation mathématique et conduction en mode continue

Dans un hacheur élévateur, l'inductance permet de lisser le courant appelé sur la source. La capacité C permet de limiter l'ondulation de la tension en sortie [42].

III.4.2.1 Equation mathématique

✓ Tension de sortie

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{1}{1-\alpha} \quad (\text{III.1})$$

Avec:

V_s : Tension de sortie ;

V_e : Tension d'entrée ;

α : Rapport cyclique.

✓ Courant de sortie

Quand $P_e = P_s$:

$$V_e \times I_e = V_s \times I_s \quad (\text{III.2})$$

Donc :

$$\frac{I_s}{I_e} = (1 - \alpha) \quad (\text{III.3})$$

où:

I_e : Courant d'entrée ;

I_s : Courant de sortie.

III.4.2.2 Conduction en mode continue

L'inductance est dimensionnée afin de permettre une conduction continue du hacheur. Une valeur minimale est donnée par [42]:

$$L_{\min} = \frac{(1-\alpha)^2 \alpha R_{ch}}{2f} \quad (\text{III.4})$$

où:

R_{ch} : Résistance de la charge ;

f: Fréquence d'échantillonnage.

La capacité est dimensionnée afin de limiter les ondulation de la tension. Une valeur minimale est donnée par [42]:

$$C_{\min} = \frac{\alpha V_s}{V_r R_{ch} f} \quad (\text{III.5})$$

Avec:

v_r : Ondulation de la tension.

III.4.2.3 Diagramme de tension et du courant

Lors de la première partie du cycle de fonctionnement, de 0 à $\alpha.T$, l'interrupteur commandé est fermé (passant), la source et la charge ne sont pas en contact durant cette phase. La diode est alors bloquée. Lors de la seconde partie du cycle, de $\alpha.T$ à T , on ouvre l'interrupteur commandé et la diode devient passante. Les formes d'ondes sont représentées sur la figure (III.11) [42], (en supposant la tension et le courant de sortie continue).

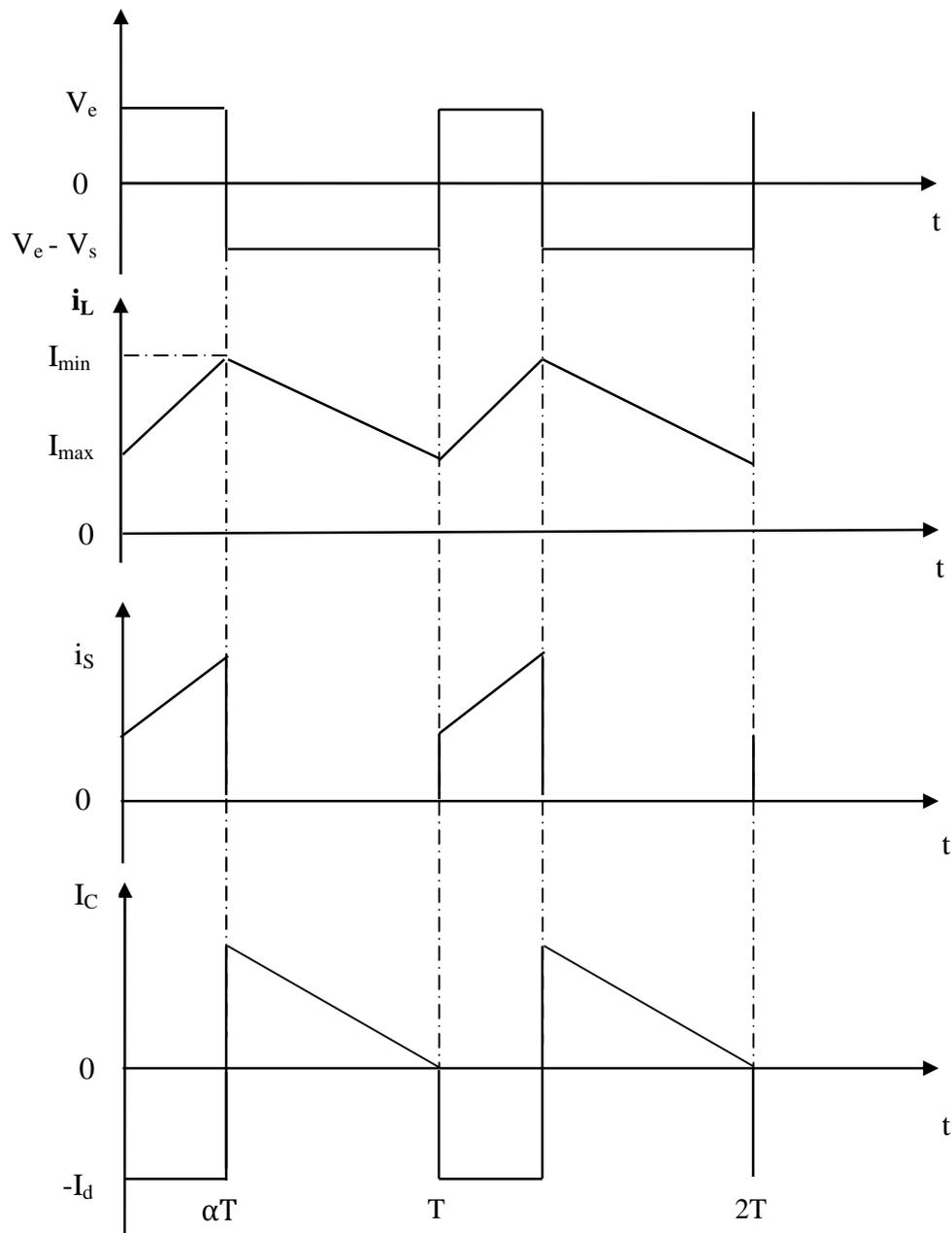


Figure (III.11) : Onde de courant et tension du hacheur élévateur

III.4.3 Commande MPPT du hacheur élévateur

III.4.3.1 Structure de la commande

C'est la plus classique. Elle consiste à comparer la modulante (le signal à synthétiser) à une porteuse (généralement à dents de scie ou triangulaire). Le signal de sortie vaut 1 si la modulante est plus grande que la porteuse, 0 sinon ; le signal de sortie change donc d'état à chaque intersection de la modulante et de la porteuse.

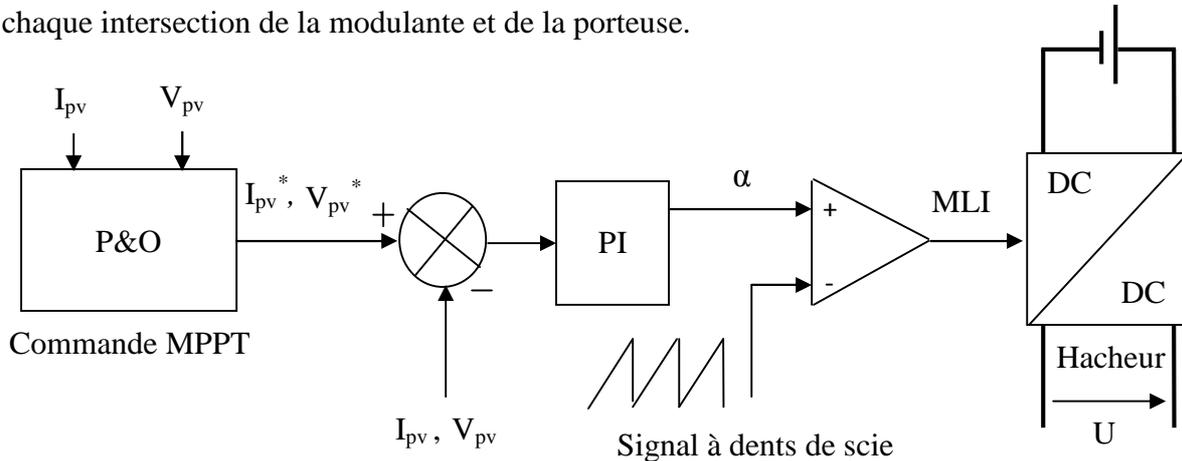


Figure (III.12) : Principe de la commande MLI de hacheur élévateur

III.4.3.2 Régulateur PI

C'est un correcteur proportionnel intégrale série, il est défini par une fonction de transfert qui régit son principe de fonctionnement. Un régulateur PI est physiquement réalisable. La figure (III.13), illustre le principe de fonctionnement d'un régulateur proportionnel intégrale série PI.

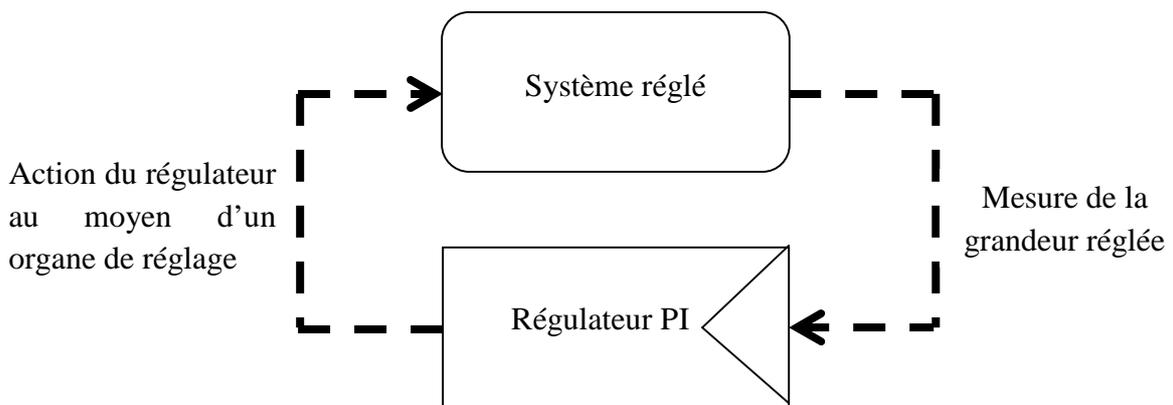


Figure (III.13) : Principe de fonctionnement du régulateur PI

La fonction de transfert d'un régulateur proportionnel intégrale PI est définie par la relation (III.6) [43] :

$$C_{(p)} = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{p \cdot T_i}\right) \quad (III.6)$$

où:

$C_{(p)}$: Fonction de transfert de régulateur PI ;

K_p : Gain proportionnel du régulateur PI ;

T_i : Constante de temps du régulateur PI.

III.5 Modélisation de la batterie plomb-acide

Dans cette étude, on a utilisé un modèle qui permet de calculer la capacité de stockage et la tension de charge/décharge. Le modèle électrique est représenté sur la figure (III.14) [44].

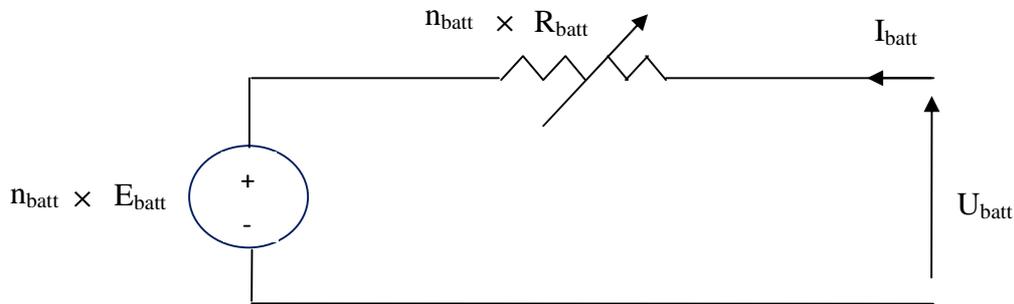


Figure (III.14) : Modèle électrique de la batterie

La batterie est caractérisée par sa capacité de stockage sa valeur est calculé par la relation (III.7) [44]:

$$C_{batt} = C_{10} \frac{1.67}{1 + 0.67 \left(\frac{I}{I_{10}}\right)^{0.9}} (1 + 0.005 \Delta T) \quad (III.7)$$

Avec:

C_{batt} : Capacité de la batterie.

$$EDC = 1 - \frac{Q}{C_{batt}} \quad (III.8)$$

Avec:

$$Q = I_{batt} \times t \quad (III.9)$$

t : Temps de décharge de la batterie.

$$V_{b-ch} = \eta_{batt} [2.16 \times SOC] + \eta_{batt} \frac{I_{batt}}{C_{10}} \left[\frac{6}{1 + I_{batt}^{1.3}} + \frac{0.27}{SOC^{1.5}} + 0.002 \right] \times (1 - 0.007 \times \Delta T) \quad (III.10)$$

où:

V_{b-ch} : Equation de charge de la batterie.

$$V_{b-déch} = \eta_{batt} [1.965 + 0.12 \times SOC] - \eta_{batt} \times \frac{I_{batt}}{C_{10}} \left[\frac{6}{1 + I_{batt}^{1.3}} + \frac{0.27}{SOC^{1.5}} + 0.002 \right] \times (1 - 0.007 \times \Delta T) \quad (III.11)$$

$V_{b-déch}$: Equation de décharge de la batterie.

III.6 Modélisation de l'onduleur de tension MLI monophasée

Le filtrage de la tension, ou du courant de sortie d'un onduleur, ne délivrant qu'un créneau de tension ou de courant par alternance, est difficile et onéreux car le premier harmonique à éliminer (harmonique 3, ou harmonique 5), a une fréquence trop voisine de celle du fondamentale.

Aussi, on utilise de plus en plus la modulation de largeur d'impulsions (MLI) : on forme chaque alternance de la tension de sortie de plusieurs créneaux rectangulaires convenables.

La multiplication du nombre des « impulsions » formant chaque alternance présente deux avantages :

- ✓ Elle repousse vers les fréquences les plus élevées les harmoniques de tension ou de courant de sortie, ce qui facilite le filtrage.
- ✓ Elle permet de faire varier la valeur du fondamentale de la tension ou du courant de sortie avec les deux « interrupteurs » par phases.

Le schéma de la conversion d'énergie est donné sur la figure (III.15) [45].

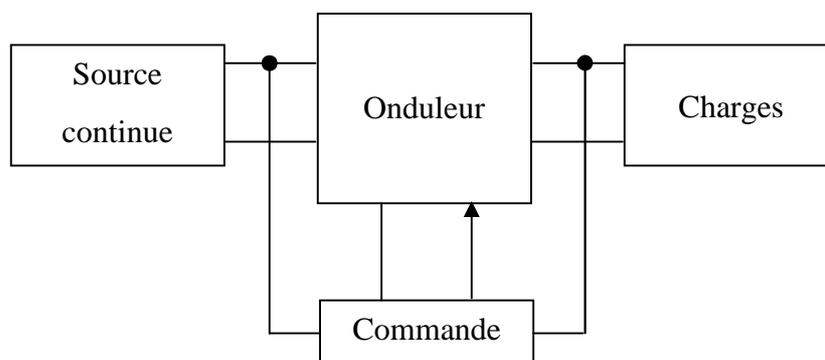


Figure (III.15) : Chaîne de conversion d'énergie

III.6.1 Modèle mathématique de l'onduleur monophasée

Les onduleurs sont des convertisseurs statiques de l'électronique de puissance. Ils sont utilisés dans tout système électrique notamment le notre, il permet de transformer la tension continue (V_{ac}) fourni par un générateur PV en tension alternative (V_{ac}) [2].

Le schéma fonctionnel qui en résulte, montre un onduleur en bon ordre de marche au niveau technique, et pouvant être utilisé, tel quel pour l'alimentation de charge alternatives est représentée sur la figure (III.16).

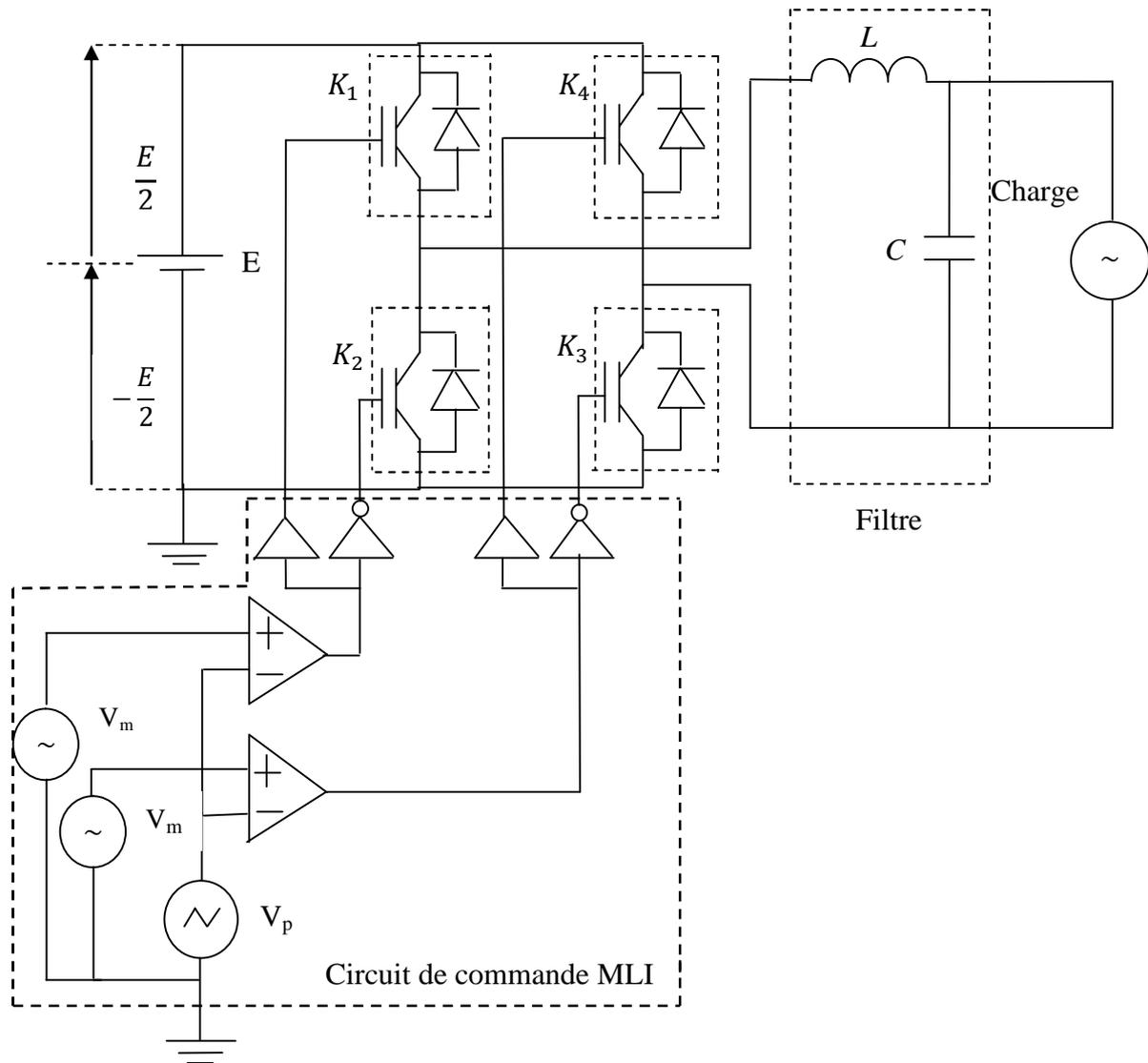


Figure (III.16) : Schéma électrique de l'onduleur monophasé

Le circuit de puissance comprend :

- ✓ Une source de tension continu à point milieu : $E/2, -E/2$, tel que $E= 48V$;
- ✓ La cellule onduleur constituée par les interrupteurs K_1, K_2, K_3, K_4 , qui sont des IGBT (insolated gate bipolar transistor), montées en parallèle avec des diodes dont l'objectif de dissiper les courants emmagasiné dans la charge ;
- ✓ La charge montée entre les points milieu des deux bras.

où:

V_m : Tension modulée à la sortie de l'onduleur (V)

$$V_m = E \tag{III.12}$$

E : Tension continue à l'entrée d'onduleur (V)

$$V_{\text{eff}} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \tag{III.13}$$

v_m : Amplitude de la tension de sortie après filtrage.

Le circuit de commande MLI comprend :

- ✓ Un générateur sinusoïdal (modulante), v_m fréquence 50 Hz ;
- ✓ Un générateur triangulaire (porteuse), d'une amplitude v_p et d'une fréquence d'échantillonnage $F = \frac{1}{T}$.
- ✓ Un comparateur qui génère les signaux de commande MLI.

III.6.2 Commande MLI

III.6.2.1 Principe de la commande « sinus-triangle »

La figure (III.17) montre le principe de la commande « sinus-triangle ».

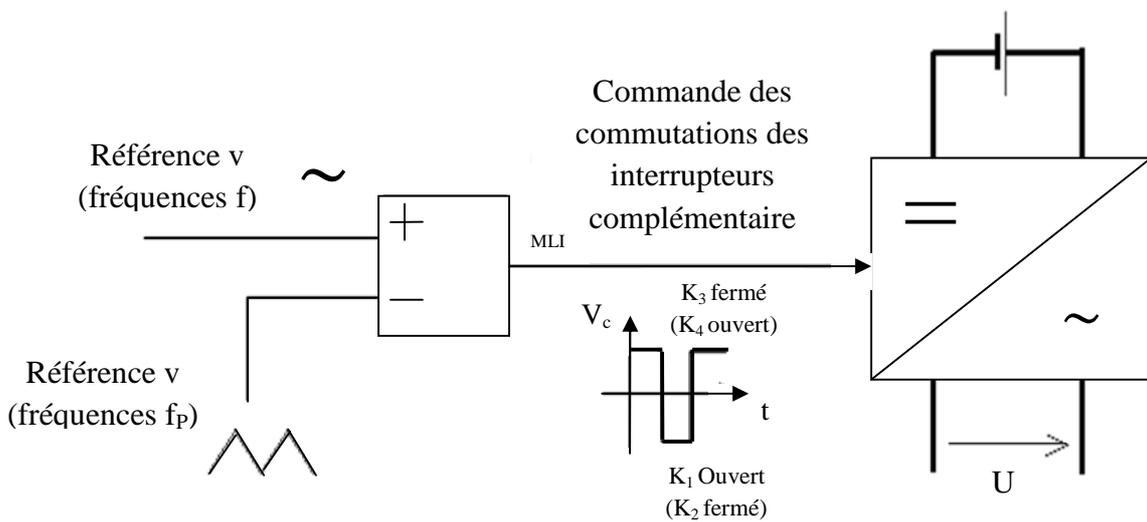


Figure (III.17) : Principe de la commande MLI

Les instants de commutation des interrupteurs complémentaires (K_1 et K_2 par exemple) sont déterminés par les intersections :

- ✓ d'une onde de référence v de fréquence F et d'amplitude v_m , représentant la tension de sortie désirée. Cette tension de référence est en général sinusoidale ;
- ✓ et d'une onde de modulation ou porteuse triangulaire v_p , de fréquence F_p nettement supérieure à la fréquence F .

Caractéristiques de la commande

- ✓ Indice de modulation m

$$m = \frac{f_p}{f} \quad (\text{III.14})$$

- ✓ Coefficient de réglage en tension r

$$r = \frac{V_m}{V_p} \quad (\text{III.15})$$

III.7 Modélisation de transformateur monophasé

Un transformateur est un quadripôle formé de deux enroulements enlaçant un circuit magnétique commun. C'est une machine statique permettant, en alternatif, la modification de certaines grandeurs (tension, courant) sans changer leur fréquence.

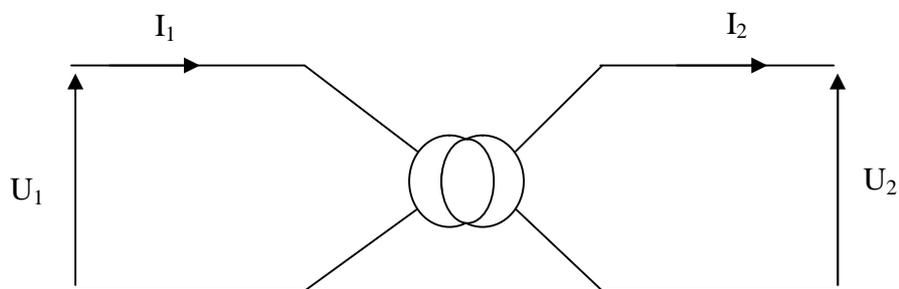


Figure (III.18) : Symbole d'un transformateur monophasé

III.7.1 Modèle électrique équivalent

La f.e.m induite est positive, si en étant la seule source de tension, elle tend à faire circuler un courant positif. A chaque instant, chaque spire d'enroulement est traversée par le même flux magnétique.

- ✓ Rapport de transformation :

$$m_p = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_2}{U_1} \quad (\text{III.12})$$

Avec:

N_1 et N_2 nombres de spires au primaire et au secondaire respectivement.

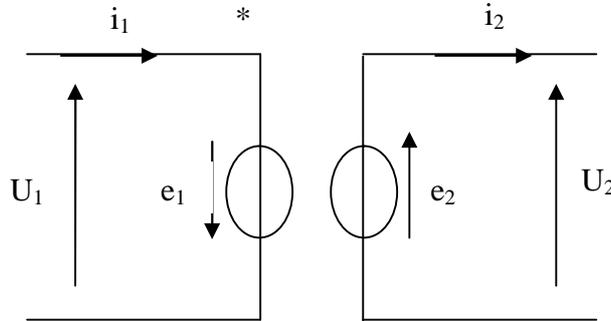


Figure (III.19) : Schéma électrique du transformateur monophasé

III.8 Modélisation du groupe diesel

Le groupe diesel est constitué d'un moteur diesel à deux temps et une machine synchrone.

Le couple développé par le moteur diesel, donné par l'équation (III.13), pourrait être simplement modélisé par la fonction de transfert du premier ordre à temps constant, τ_c est la constante de combustion effectuée et τ_d est le retard au démarrage de la combustion pur [40]:

$$T_{\text{diesel}} = \frac{F}{1 + \tau_c p} e^{-\tau_d} \quad (\text{III.13})$$

Avec :

T_{diesel} : Couple développé par le moteur diesel ;

F : Gain relative au niveau du combustible ;

τ_c, τ_d , Constantes données par le constructeur.

Généralement le moteur diesel est modélisé par le diagramme fonctionnel représenté sur la figure (III.20). Le correcteur intégrale proportionnel est associé à T_{diesel} , pour réguler la tension de sortie du générateur diesel, à la valeur de la tension de sortie du système.

L'utilisation des moteurs diesels comme moteur d'entraînement dans les groupes électrogènes de petite puissance est due aux avantages qui présentent, qu'on peut citer [40] :

- ✓ Rendement élevé comparativement à celui d'une centrale à gaz ou à vapeur ;
- ✓ Fiabilité et la simplicité de fonctionnement.

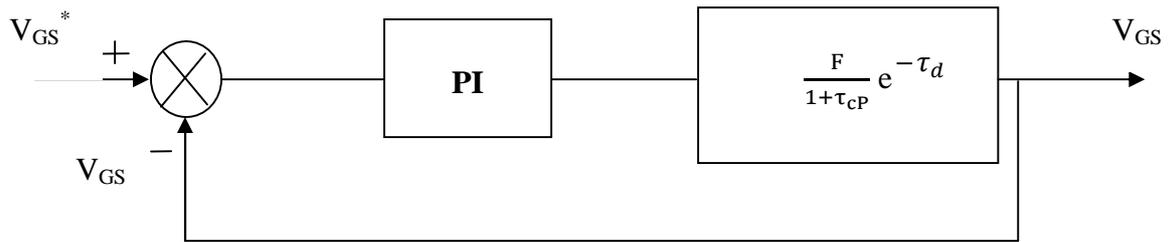


Figure (III.20) : Diagramme fonctionnel du générateur diesel

III.9 Conclusion

Dans ce chapitre, on a étudié les sous-systèmes de notre installation hybride, pour chacun on a élaboré des modèles soit à partir des données du constructeur ou bien, des hypothèses simplificatrices.

L'optimisation de la production d'énergie de notre système consiste à modéliser chaque maillon de la chaîne, d'une manière très fine est précise. Les modèles des sous systèmes de production élaboré dans ce chapitre seront utilisées à cet effet. Le chapitre suivant sera consacré à la simulation numérique de système de production hybride.

IV.1 Introduction

La rigueur du dimensionnement assure pour chaque installation électrique une meilleure efficacité, pour tester cette dernière, on a simulé sous un logiciel mathématique (MATLAB/Simulink/SimPowerSystem), tous les étages de système hybride PV/Diesel, dont l'objectif est de trancher sur sa fiabilité avant son installation.

Pour ce faire, on a élaboré un programme de simulation pour simuler le système global sur une durée de vingt-quatre heures. Les résultats de la simulation, seront représentés graphiquement, afin de visualiser le transit de l'énergie électrique des sources à la charge et le comportement de système global.

IV.2 Stratégie de gestion d'énergie

L'organigramme, est une représentation schématique, un graphique permettant de représenter et de visualiser le transit de l'énergie, par ordre de priorité et selon son utilité. Sur la figure (IV.1), on a présenté un organigramme de gestion d'énergie de notre système PV/Diesel globale.

La schématisation d'un système de production d'énergie électrique autonome, via un organigramme, permet une bonne gestion d'énergie d'une manière à assurer une alimentation continue et une fiabilité permanente, ainsi qu'une longévité à notre système PV/Diesel.

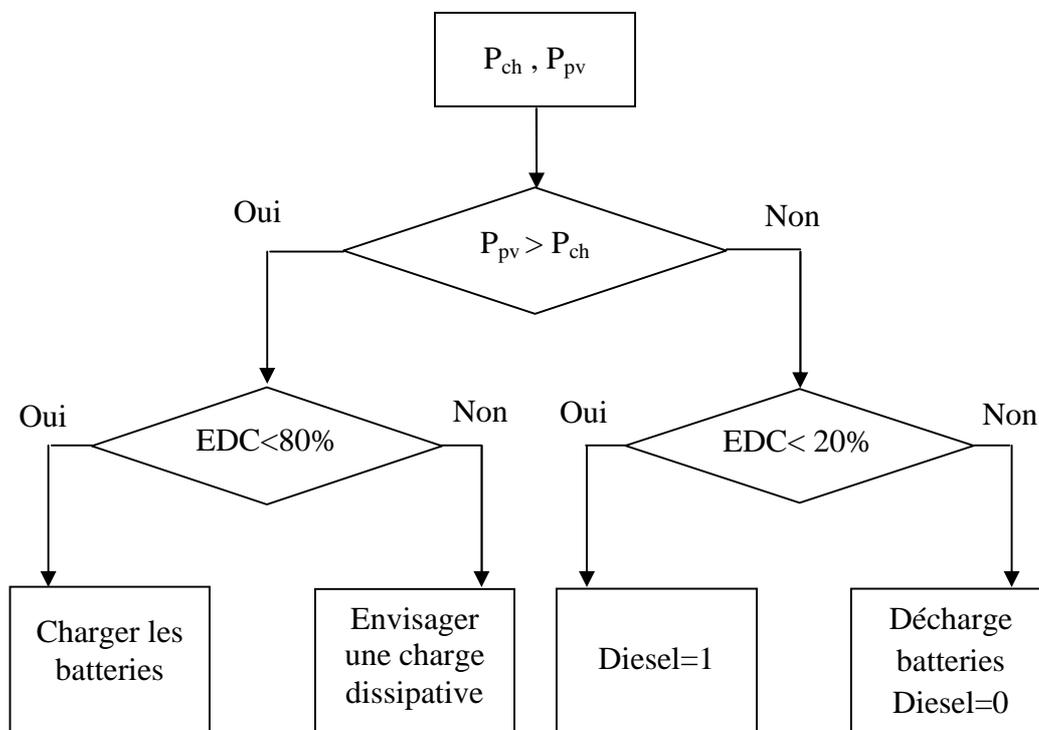


Figure (IV.1) : Stratégie de gestion d'énergie dans le système hybride PV/Diesel

✓ **Cas n°1 : $P_{pv} \geq P_{ch}$**

Si la puissance P_{PV} fournie par le champ PV est supérieure à la puissance de la charge P_{ch} et que l'état de charge des batteries est inférieure à 80%, le surplus sera fourni aux batteries de stockage. Si l'état de charge des batteries est à 80%, le surplus produit par le champ PV sera fourni à la charge dissipative.

✓ **Cas n°2 : $P_{pv} < P_{ch}$**

Si la puissance P_{PV} fournie par le champ PV est inférieure à la puissance de la charge P_{ch} et l'état de charge des batteries est supérieure à 20%, les batteries fournissent le déficit d'énergie. Par contre, si l'état de charge des batteries est inférieure à 20%, le groupe électrogène assure l'alimentation de la charge et le surplus servira à charger les batteries.

IV.3 Générateur diesel

✓ **Courbe du couple mécanique du GD**

Sur la figure (IV.2), on a représenté l'allure du couple mécanique du générateur diesel étudié dans le cas de notre installation.

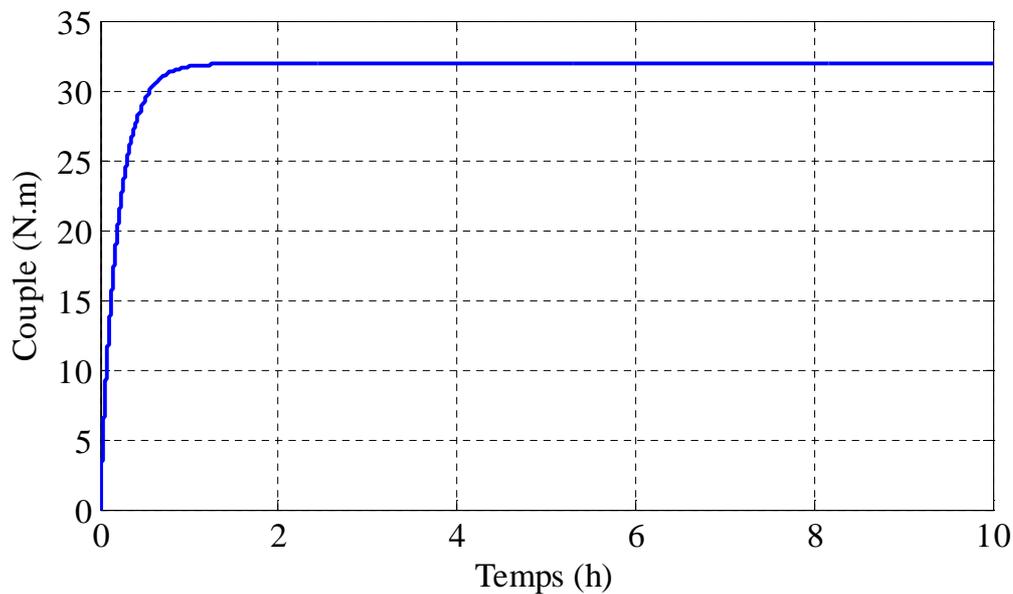


Figure (IV.2) : Courbe du couple mécanique du générateur diesel

D'après l'allure, on remarque que le couple mécanique est d'une valeur de 32.5 N.m, dans son régime nominal.

✓ Courbe de la puissance du GD

Afin d'assurer une continuité de l'alimentation en énergie électrique de notre habitation isolée, l'intégration du groupe électrogène est d'un grand apport. Sur la figure (IV.3), on a représenté la courbe de la puissance mécanique du groupe électrogène.

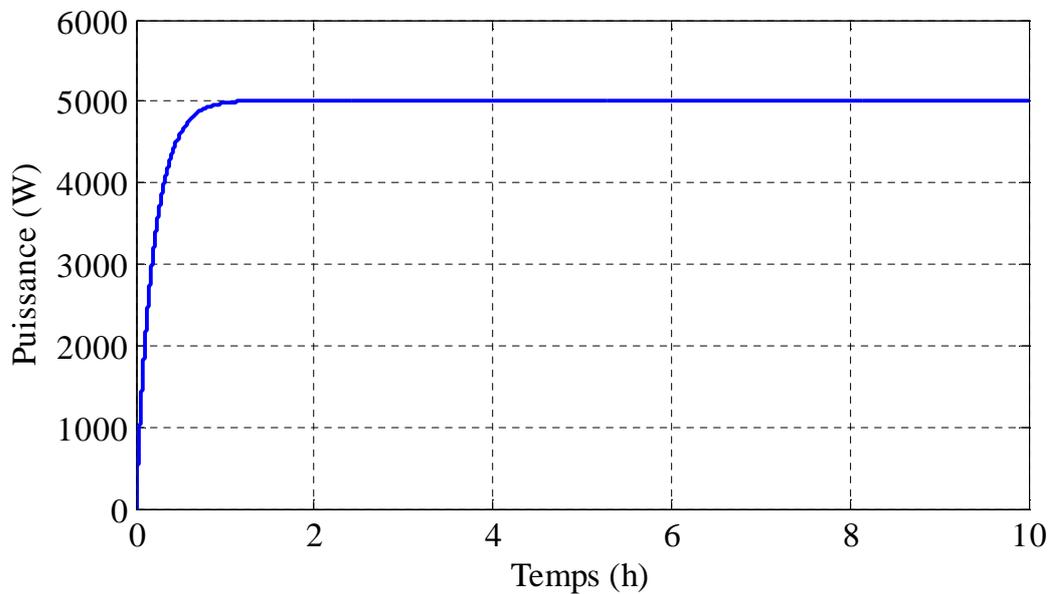


Figure (IV.3) : Courbe de la puissance du générateur diesel

La puissance délivrée par le générateur diesel est d'une valeur de 5000 Watt, cette dernière assure le pic de la consommation.

IV.4 Profil de charge

Le profil de charge représente l'évolution de la puissance utilisée au cours du temps. Elle permet d'identifier les moments de la journée où les habitants consomment le plus d'électricité. Sur la figure (IV.4), la représentation graphique, de la courbe de charge à trois pics de consommation, concernant notre habitation isolée, on distingue une phase qui prend l'intervalle de dix-huit-heures à vingt-deux-heures, caractérisée par un pic de consommation très important à vingt-heures d'une puissance de 4 kW.

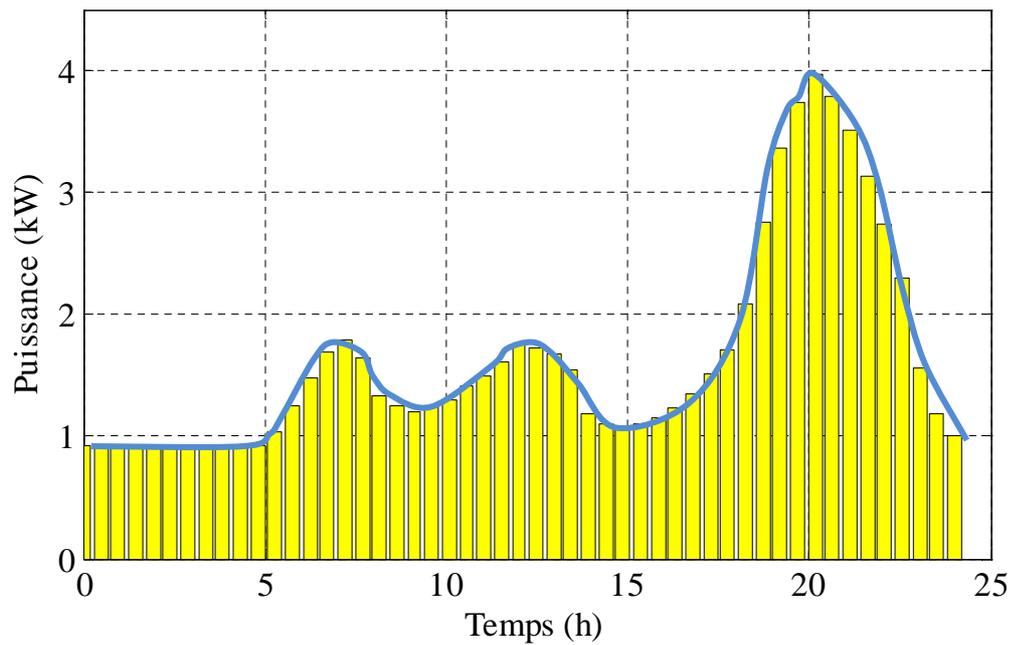


Figure (IV.4) : Graphe de profil de charge de notre habitation isolée

IV.5 Profil d'ensoleillement

Les valeurs de l'ensoleillement typique, sur une période de vingt-quatre-heures, sont représentées, sur la figure (IV.5).

A partir de six-heures du matin les valeurs de l'ensoleillement commence à s'accroître, pour atteindre le pic à midi, ensuite elle décroît pour s'annulé à dix-huit-heures.

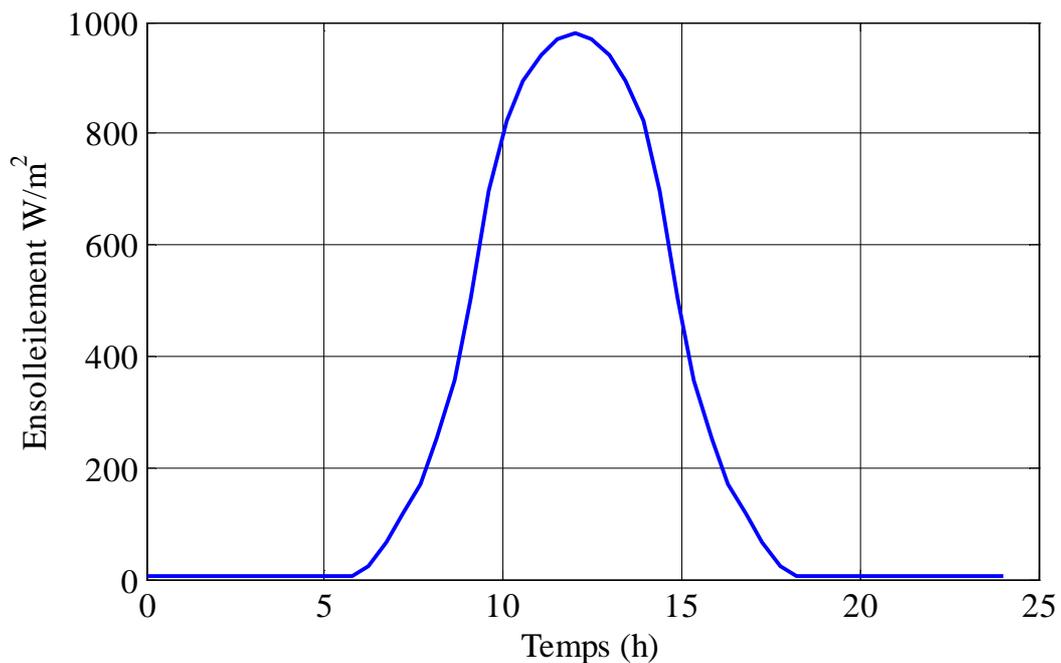


Figure (IV.5) : Profil d'ensoleillement journalier

IV.6 Résultat de simulation du système globale et interprétation des résultats

IV.6.1 Système PV

✓ Courbe du courant de champ PV

Le courant fourni par le champ PV est le résultat de la conversion photovoltaïque, plus la lumière solaire est intense, plus le courant est intense. Dès que le champ PV ne reçoit plus de lumière, le courant s'annule. C'est pour cette raison qu'un générateur photovoltaïque est considéré comme un générateur de courant.

La figure (IV.6) présente l'allure du courant généré par le champ PV sur une durée de vingt-quatre-heures. A partir de six-heures du matin pratiquement une légère génération du courant à faible intensité est remarquée, elle s'accroît pour atteindre des valeurs maximales à midi, ensuite elle se décroît. A dix-huit-heures le courant s'annule à cause de l'absence de l'irradiation.

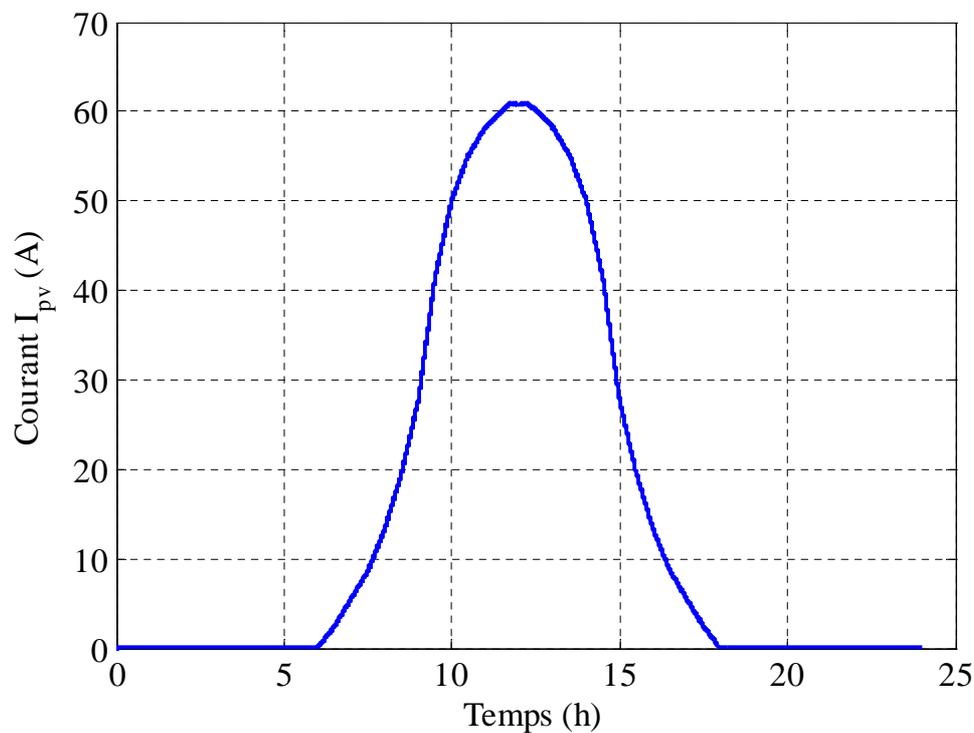


Figure (IV.6) : Courbe du courant champ PV

✓ Courbe de la tension V_{pv} du champ PV

La figure (IV.7) représente l'allure de la tension V_{pv} du champ PV pour une durée de vingt-quatre-heure.

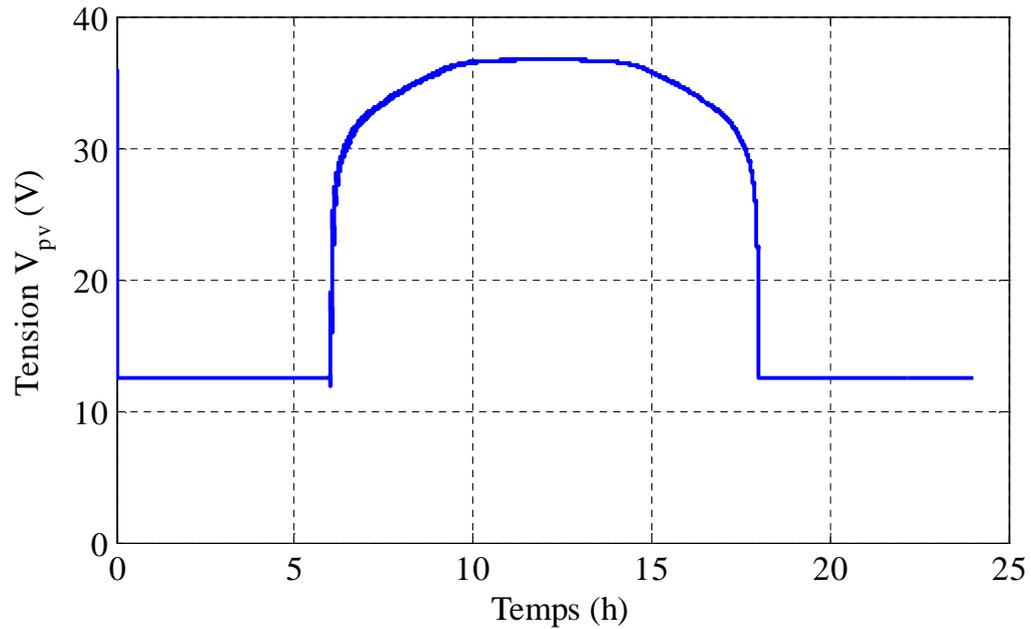


Figure (IV.7) : Courbe de la tension V_{pv} du champ PV

On remarque que lorsque le champ PV fonctionne à sa puissance maximale, la tension atteint 37V, qui est la tension au point de puissance maximale.

✓ Courbe P_{pv} - V_{pv} du champ PV

La figure (IV.8), représente la courbe de la puissance de champ PV en fonction de la tension avec MPPT.

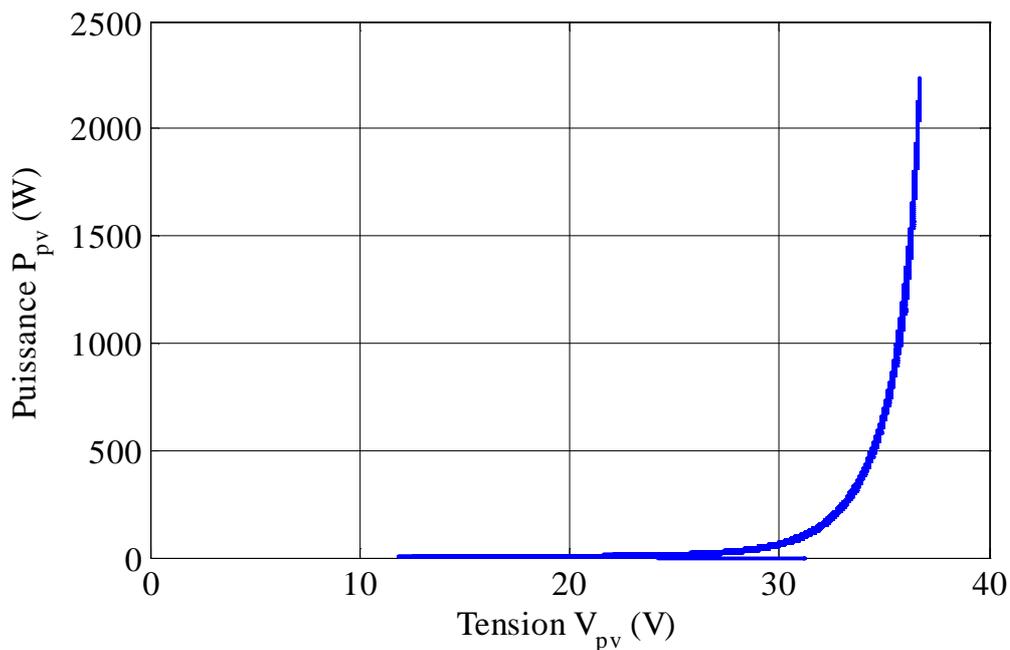


Figure (IV.8) : Courbe P_{pv} - V_{pv} du champ PV

✓ Courbe de la puissance PV produite

La puissance électrique mise en jeu dans notre système durant une journée de fonctionnement, dépend essentiellement du profil d'ensoleillement durant une journée.

La puissance produite par le champ PV est présentée sur la figure (IV.9), on distingue deux intervalles essentiels, le premier est caractérisé par une production où le pic de cette dernière est donnée à midi de la journée, ensuite elle décroît pour s'annuler à dix-huit-heures. Le deuxième intervalle, de dix-huit-heures à cinq-heures aucune production n'est fournie.

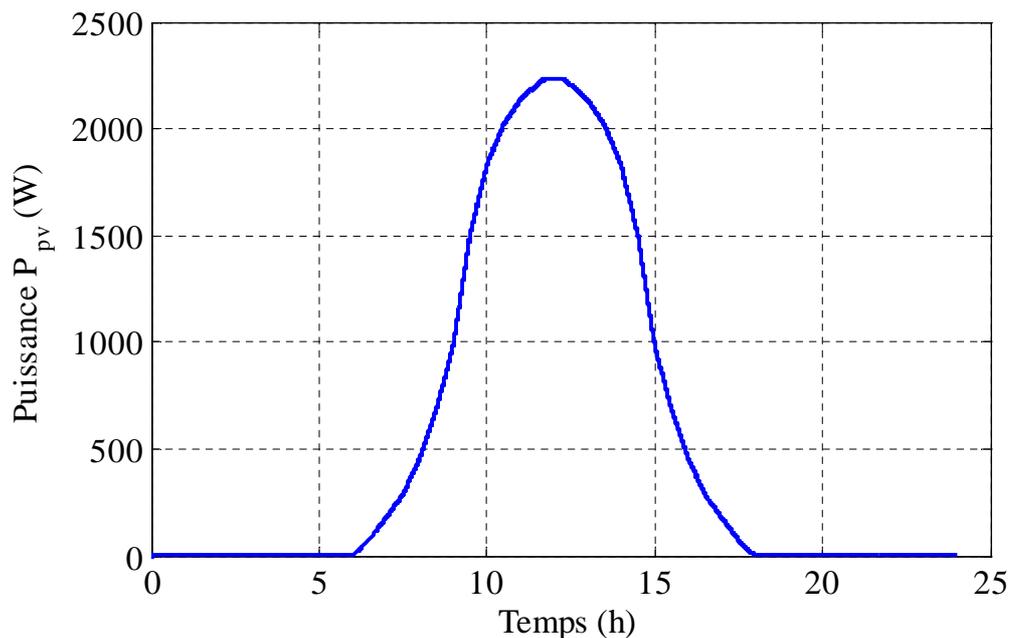


Figure (IV.9) : Courbe de la puissance du champ PV fourni

IV.6.2 Batterie

Une batterie d'accumulateurs, ou plus communément une batterie, est un ensemble d'accumulateurs électriques reliés entre eux de façon à créer un générateur électrique de tension et de capacité désirée. Ces accumulateurs sont parfois appelés éléments de la batterie ou cellule.

✓ Courbe de la tension de la batterie

La tension de la batterie est 48 V, l'allure de cette tension est représentée sur la figure (IV.10), on remarque une légère variation de la tension à ces bornes, cette variation est dû à la variation de l'état charge et décharge de la batterie. En cas de décharge, la tension diminue jusqu'à un niveau minimal acceptable pour une batterie plomb-acide, il est défini comme le seuil de tension de décharge.

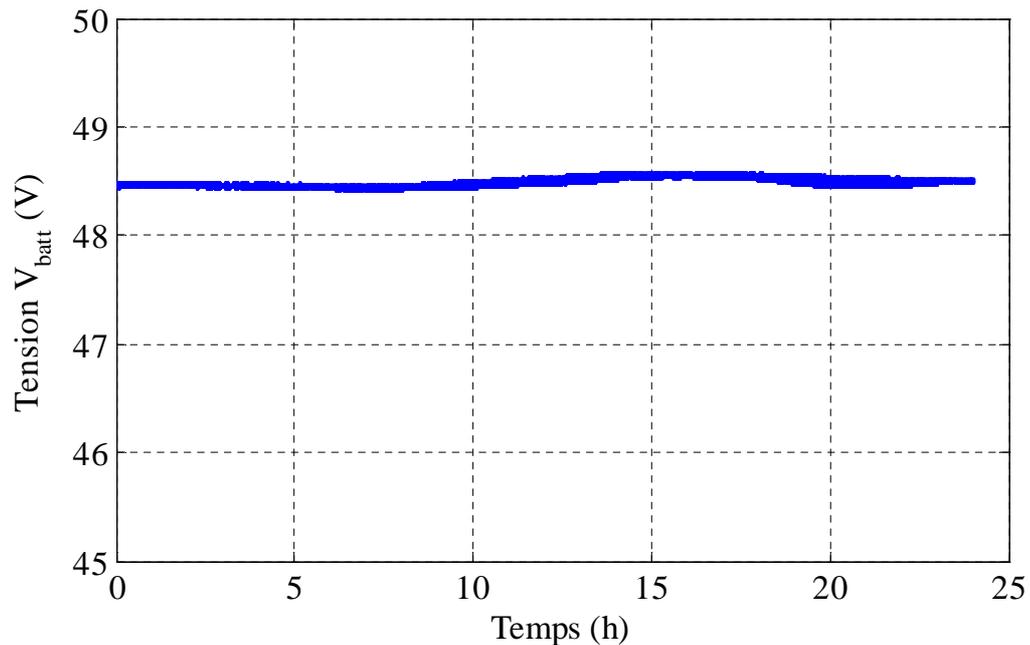


Figure (IV.10) : Courbe de tension de système de stockage

✓ Courbes du courant et de la puissance de la batterie

Les batteries est une source complémentaire au champ PV, au terme d'alimentation de la charge, on a relevé l'allure de la puissance fournie par les batteries représentée sur la figure (IV.11). On remarque que :

- ✓ La batterie se charge de neuf-heures à seize-heures, tandis que de seize-heures jusqu'à vingt-deux-heures elle délivre sa puissance pour couvrir le déficit d'énergie.

D'après l'allure du courant délivré par la batterie, représentée sur la figure (IV.12), on remarque trois intervalles essentiels :

- ✓ De minuit au neuf-heures du matin l'allure décroît, la batterie débutera son courant sur la charge.
- ✓ De neuf-heures à seize heures après midi la batterie se charge, donc elle ne délivre pas le courant.
- ✓ De seize-heures au minuit la batterie, débite son courant à la charge pour assurer le déficit d'énergie dans le système.

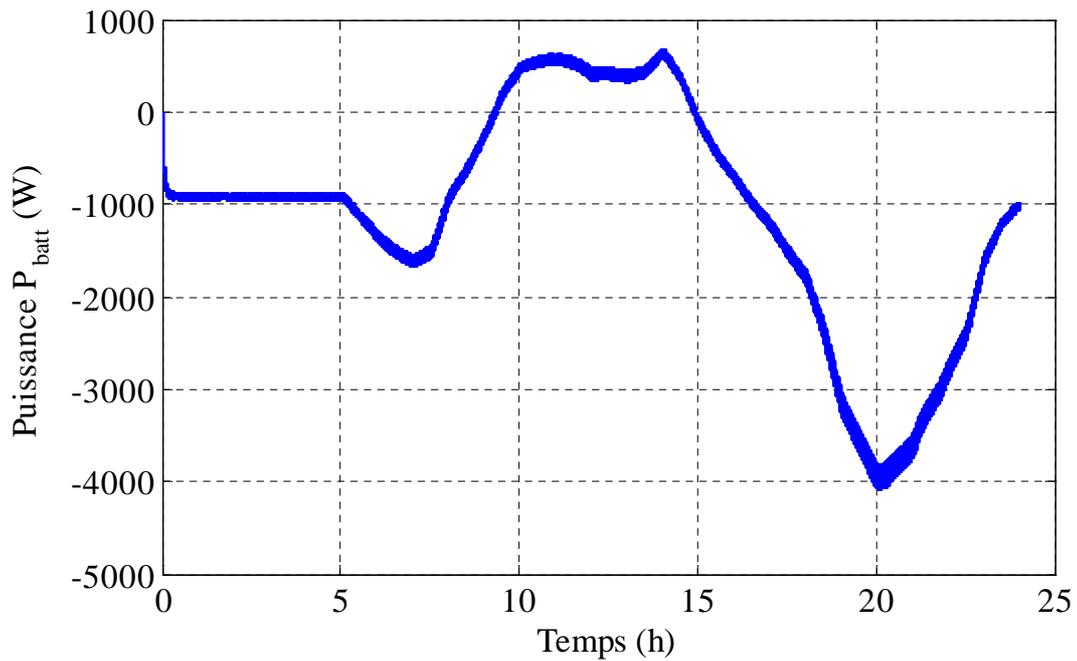


Figure (IV.11) : Courbe de la puissance délivrée par la batterie

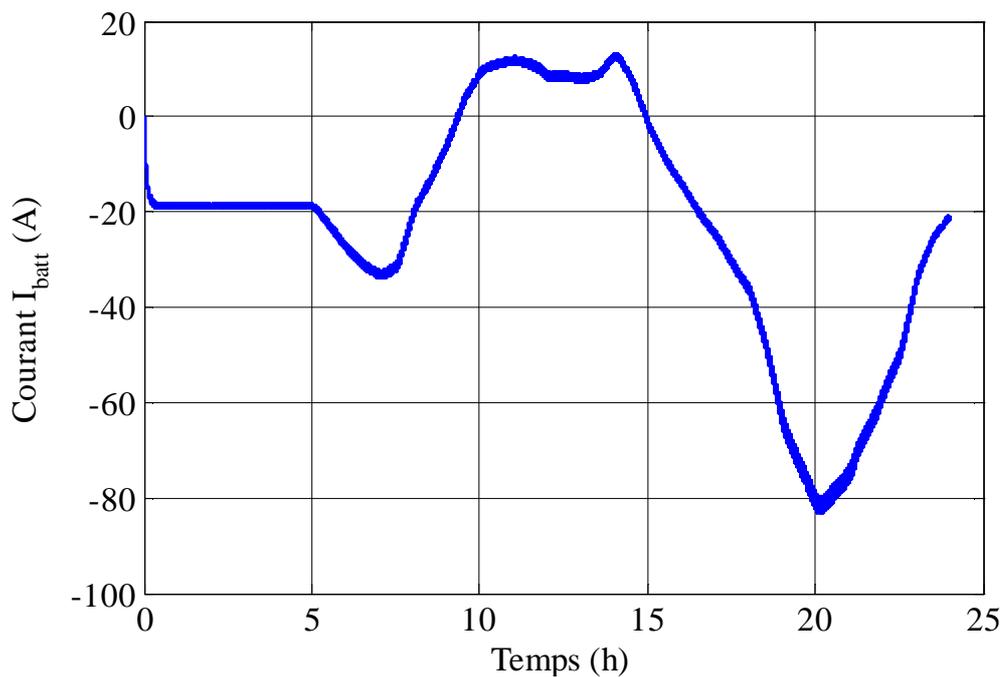


Figure (IV.12) : Courbe de courant de la batterie

✓ Courbes d'état de charge (EDC)

Au cours de son utilisation, une batterie placée dans un système hybride autonome peut subir les surcharges au delà de 80%, ou bien des décharges profondes au dessous de 20%. Sur la figure (IV.13), on a représenté l'allure de l'EDC de la batterie utilisée dans notre système.

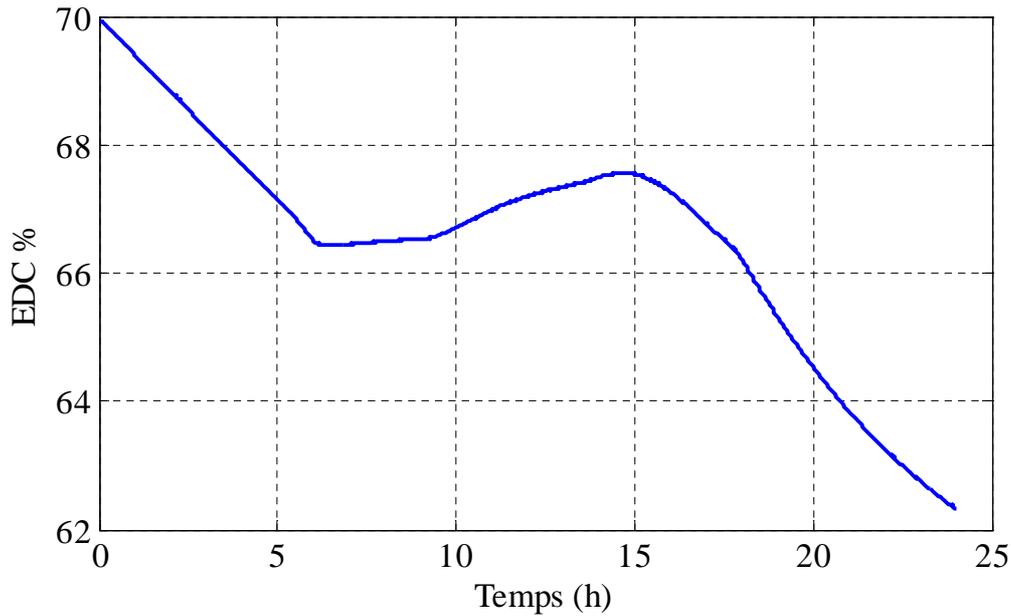


Figure (IV.13) : Courbe de l'EDC dans la batterie

IV.6.3 Charge

✓ Courant-tension au secondaire de transformateur

Les courbes courant-tensions au secondaire du transformateur sont représentées sur les figures (IV.14) et (IV.15) respectivement.

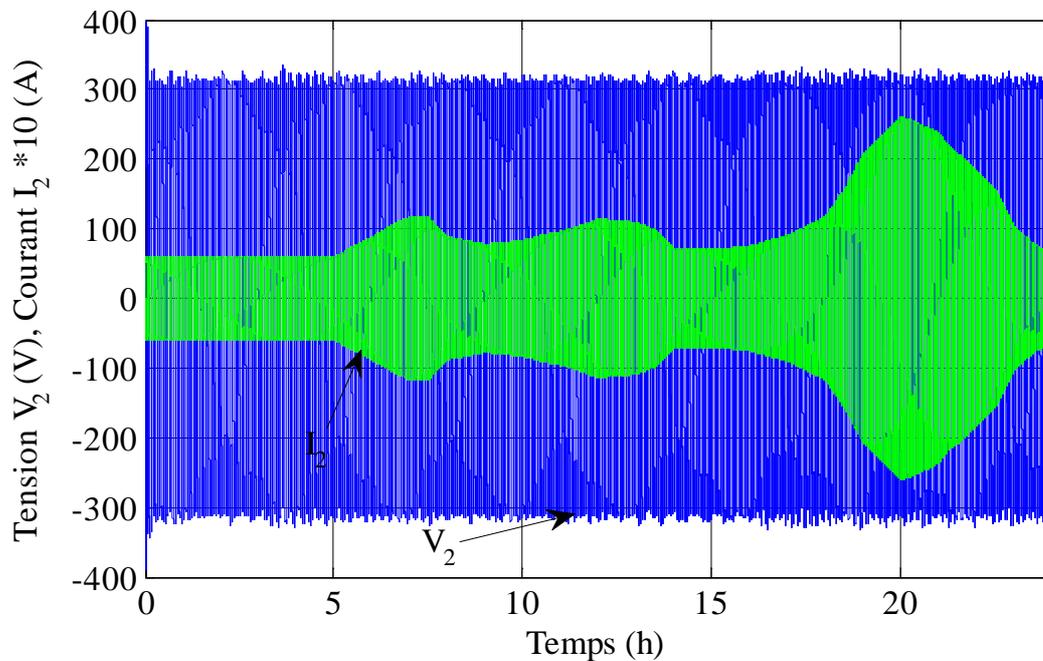


Figure (IV.14) : Allure du courant et de la tension au secondaire de transformateur pour vingt-quatre-heures

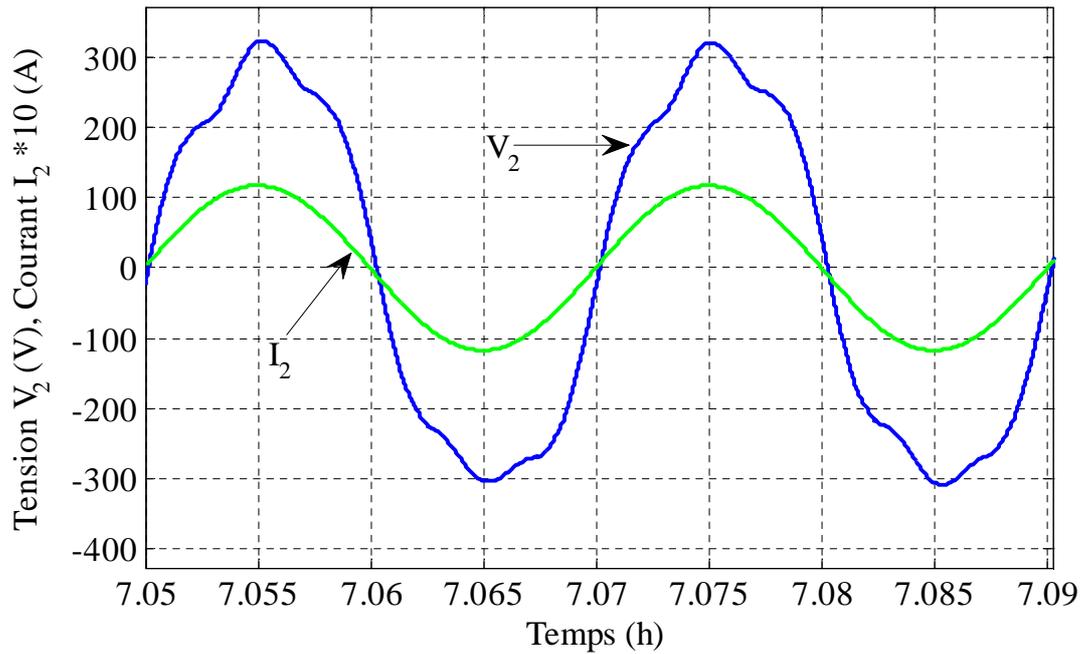


Figure (IV.15) : Allure du courant-tension au secondaire du transformateur

✓ Courbe du courant-tension efficace au secondaire

La valeur efficace de la tension fixe à la sortie de transformateur utilisé dans la chaîne de conversion, est représentée sur la figure (IV.16), elle est d'une valeur de 230 V.

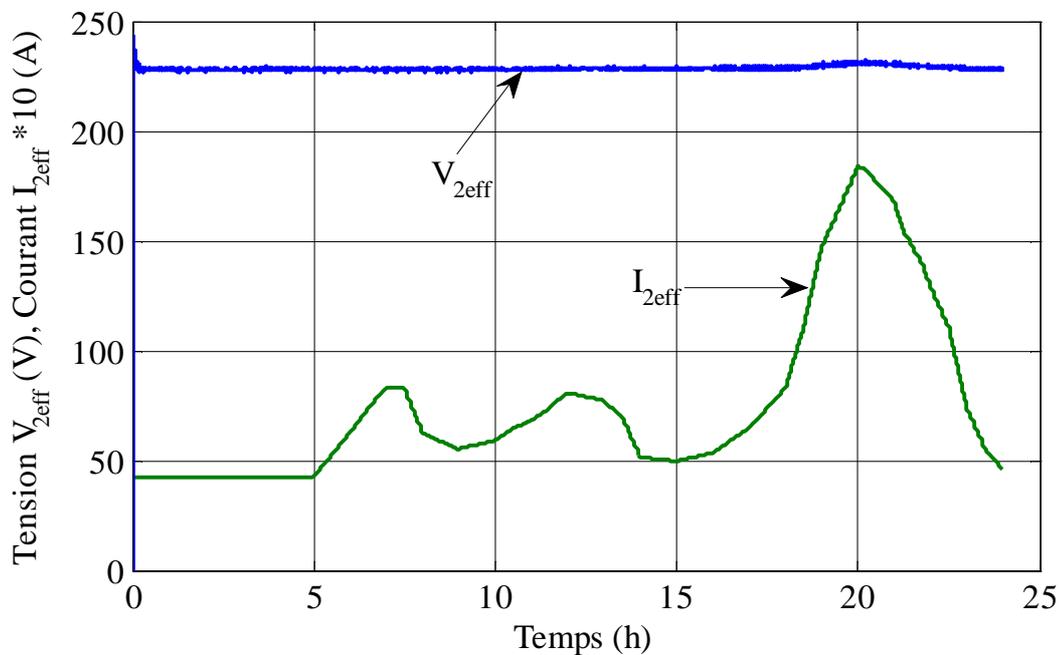


Figure (IV.16) : Courbes de V_{eff} et de I_{eff} au secondaire du transformateur

Sur le même graphe, on a visualisé l'allure du courant efficace au secondaire du transformateur, le courant suit le profil de charge car c'est le courant demandé directement par la charge.

IV.6.4 Courbe des puissances (P_{pv} , P_{ch} , P_{batt})

Afin d'analyser les puissances fournies, soit par le champ PV ou les batteries électrochimiques d'une part et la puissance consommée par la charge d'une autre part, les allures des puissances, du champ PV, de la charge et la puissance de système de stockage ont été relevés sur le même graphe de la figure (IV.17).

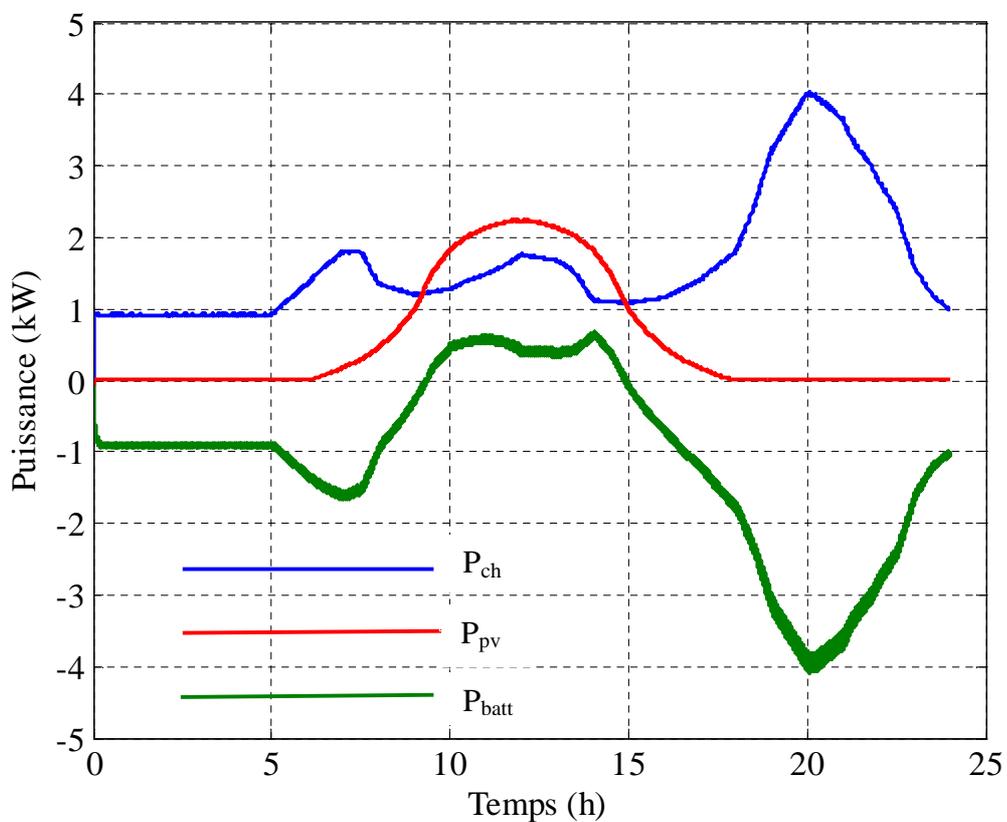


Figure (IV.17) : Courbes des puissances (P_{pv} , P_{ch} , P_{batt})

Sur le graphe, on distingue cinq intervalles essentiels :

- ✓ De minuit à six-heures du matin la puissance de champ est nulle, les batteries alimentent exclusivement la charge;
- ✓ Du six-heures à onze-heures l'alimentation de la charge est assurée par le champ PV et le système de stockage;

- ✓ Onze-heures à quinze-heures le champ produit suffisamment d'énergie pour alimenter la charge et un surplus fourni aux batteries de stockage ou à la charge dissipative;
- ✓ De quinze-heures à dix-huit-heures, le champ PV et le système de stockage assurent le besoin de la charge.
- ✓ L'absence d'une irradiation suffisante, la puissance produite par le champ est nulle, le système de stockage assure l'alimentation de la charge, cet intervalle est caractérisé par le pic de la consommation, il est recommandé de savoir utiliser les équipements courants à forte puissance électrique et surtout évité leurs utilisations simultanément.

IV.7 Conclusion

Dans ce chapitre, on a implémenté une stratégie de contrôle et de transit d'énergie électrique afin de protéger notre système de stockage par des batteries électrochimique.

Pour tester son efficacité, on a simulé le système global sous l'environnement (MATLAB/Simulink/SimPowerSystem), les courbes des sous systèmes ont été relevées.

Pour chaque étage du système on a relevé les courbes courant-tension-puissance. Les résultats de test de simulation de notre installation hybride PV/Diesel montrent l'efficacité et la fiabilité de notre dispositif.

Conclusion générale

L'objectif de ce travail était l'étude, le dimensionnement et la simulation numérique du fonctionnement d'un système de production d'énergie électrique autonome hybride, qui se compose d'un champ photovoltaïque, un dispositif de stockage par batteries électrochimique et d'un groupe diesel comme source de secours et d'appoint, au champ PV pour alimentation d'une habitation isolée.

Le dimensionnement du système hybride PV/Diesel de production d'énergie électrique, est fait sur la base de connaissance de potentiel énergétique du site et après avoir évalué le besoin journalier, de notre habitation isolée.

Pour modéliser notre système hybride, on a effectué le choix d'une chaîne de conversion photovoltaïque, un modèle de cellules qui compose les panneaux, un hacheur MPPT à commande MLI, afin de pousser notre champ à fonctionner à sa puissance maximale quelque soit les conditions météorologiques.

Les batteries acide-plomb, l'onduleur à MLI, le transformateur monophasé et le groupe diesel ont fait l'objet d'une modélisation mathématique, afin d'assurer une approche réelle aux conditions d'utilisations.

Comme perspective, nous espérons que notre travail de simulation et de dimensionnement soit complété par des tests de validation sur le terrain afin de connaître les performances réelles de notre système hybride et que la modélisation qu'on a effectué soit enrichie.

A.1 Calcul des régulateurs PI

A.1.1 Structure du régulateur

La fonction de transfert d'un régulateur PI classique est donnée par l'expression suivante :

$$C(s) = K_p + K_i \frac{1}{s} \quad (\text{A-1})$$

K_p : Gain proportionnel du correcteur ;

K_i : Gain intégral du correcteur (s est l'opérateur de Laplace).

L'expression (A-1) peut se mettre aussi sous la forme suivante :

$$C(s) = K_p \frac{1+T_i s}{T_i s} \quad (\text{A-2})$$

Tel que : $T_i = \frac{K_p}{K_i}$ est la constante de temps du régulateur

Le schéma bloc du correcteur PI correspondant aux deux expressions (A-1) et (A-2) est donné sur la figure (A-1).

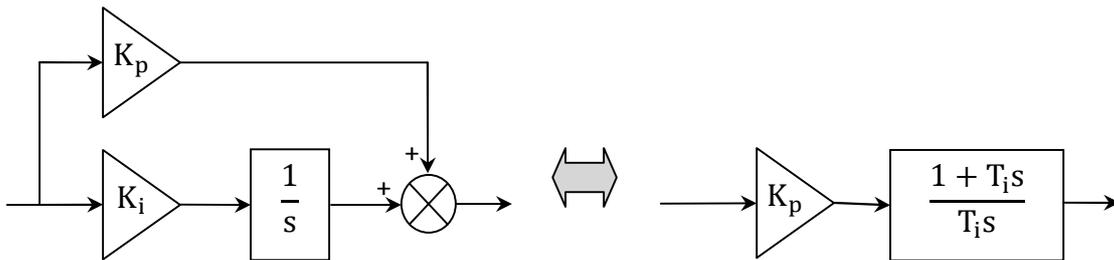


Figure A-1 : Schéma bloc d'un régulateur PI

A.1.2 Calcul des paramètres

On considère un processus dont la fonction de transfert est de la forme :

$$G(s) = \frac{k}{1+\tau s} \quad (\text{A-3})$$

Tel que : k est le gain statique, τ est la constante de temps du processus.

La régulation du processus en utilisant un correcteur PI est présentée par la figure (A-2).

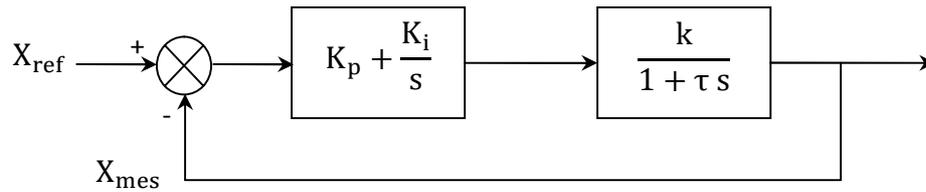


Figure A-2 : Schéma bloc d'un régulateur PI

Afin de calculer les régulateurs de vitesse, on a considéré une fonction de transfert de second ordre. En effet, la fonction de transfert en boucle fermée relative au schéma de la figure (A-2) est exprimé par :

$$H(s) = \frac{1+T_i s}{1+T_i \frac{1+kK_p}{kK_p} s + \frac{T_i \tau}{kK_p} s^2} \quad (\text{A-4})$$

Le dominateur de la fonction de transfert $H(s)$ (de second ordre) est de la forme :

$$D(s) = 1 + \frac{2\zeta}{\omega_n} s + \frac{1}{\omega_n^2} s^2 \quad (\text{A-5})$$

Tel que : ζ est le coefficient d'amortissement, ω_n est la pulsation propre.

$$\begin{cases} K_i = \frac{\tau \omega_n^2}{k} \\ K_p = \frac{2\zeta K_i}{\omega_n} - \frac{1}{k} \end{cases} \quad (\text{A-6})$$

Les paramètres ζ et ω_n sont choisis pour avoir une réponse stable, rapide et précise, en effet :

Pour $\zeta = 0.7$, on a $t_r \omega_n = 3$ (t_r est le temps de réponse choisi), alors $\omega_n = t_r/3$.

Pour le calcul des autres régulateurs, on a considéré une fonction de transfert en boucle fermée du premier ordre qui s'exprime par :

$$F(s) = \frac{1}{1+T_f s} \quad (\text{A-7})$$

D'autre part :

$$F(s) = \frac{C(s) G(s)}{1+C(s) G(s)} \quad (\text{A-8})$$

On en déduit alors l'expression de $C(s)$ qui s'identifie à un régulateur PI :

$$C(s) = \frac{1+\tau s}{k T_f s} = \frac{\tau}{k T_f} \frac{1+\tau s}{\tau s} \quad (\text{A-9})$$

En comparant les expressions (A-2) et (A-9), on déduit :

$$\begin{cases} T_i = \tau \\ K_p = \frac{\tau}{k T_f} \end{cases} \quad (\text{A-10})$$

A.2 les paramètres du PI utilisés dans notre simulation:

Paramètres du régulateur PI	K_p	K_i
Valeurs	0.2	190

Références Bibliographiques

- [01] : M. Hankins, " Installations solaires photovoltaïques autonomes ", conception et installation d'unités non raccordées au réseau, Edition dunod, 2012.
- [02] : A. Labouret, P. Cumunel, J-P. Braun, B. Faraggi, " Cellules Solaires ", les bases de l'énergie photovoltaïque, ETSF, 5eme édition technique et scientifiques françaises, aout 2010.
- [03] : S. Mohamed Ait cheikh " Etude, investigation et conception d'algorithmes de commande au système photovoltaïque ", Thèse de doctorat, école national polytechnique Alger 2007.
- [04] : A. Labouret, M. Viloz," Installation Photovoltaïques ", Conception et dimensionnement d'installation raccordées au réseau, 5eme Edition, Dunod, 2012.
- [05] : T. Desrus, " Développement de cellules photovoltaïques à hétérojonctions silicium et contacts en face arrière" , Thèse de doctorat, institut national des sciences Appliquer de Lyon, 2009.
- [06] : S. Petibon, " Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïque " , Thèse de Doctorat, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2009.
- [07] : H. Ben Cheikh " Simulation numérique de modèle collecteur hybride photovoltaïque/photo thermique " , Mémoire de Magister, Université de Constantine, 2009.
- [08] : Photopiles solaires, " Alain Ricaud, Edition Presses polytechniques et universitaire romandes", 2007.
- [09] : H. Bennacer, " Modélisation d'un système photovoltaïque" , Mémoire de Magister, Université D.Liabes Sidi bel abbès, 2009.
- [10] : O. Gergaud, "Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolienne et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur " , Thèse de doctorat de l'école normale supérieur de cachant, France, 2002.

[11] : A. Saadi, " Etude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque," Mémoire de Magister, Université de Biskra, 2000.

[12] : S. Lalouni, "Etude, commande et simulation d'une chaîne hybride (photovoltaïque-éolienne) de production d'énergie électrique ", Thèse de Doctorat en Science, université de Bejaia, 2009.

[13] : S. Astier et B.Dakyo, " Les systèmes photovoltaïques autonomes non embarqués pour la production d'énergie électrique ", Journées EEA, Paris(France) , 1999.

[14] : V. Salas, E.Olias, A.Barra et A. Lazaro, " Review of the Maximum Power Point Tracking Algorithms for Stand-Alone Photovoltaic Systems, Solar Energy Materials & Solar Cells ", Vol: 90, N°11, pp: 1555 –1578, 2006.

[15] : N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo and M. Vitelli, " Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method ", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.20, No. 4, pp. 16-19, Mar. 2004.

[16] : D. Sera, T. Kerekes, R. Teodorescu, and F. Bladbjerg, "Improved MPPT Algorithms for rapidly Changing Environmental Conditions", Power Electronics and Motion Control Conference, 2006, EPE-PEMC 2006. 12th International, pp. 1614-1619, Aug. 2006.

[17] : T. R. Mtshali, G. Coppez, S.Chowdhury and S.P. Chowdhury " Simulation and Modelling of PV-Wind-Battery Hybrid Power System ", july 2011.

[18] : D.Paire, "Dimensionnement et gestion d'énergie de systèmes d'entraînements électriques hybrides " : Application à un ascenseur avec récupération d'énergie, Thèse de doctorat de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2010.

[19] : F.Béguin, and E. Raymundo-piñero, "Nouveaux développements dans le domaine des super condensateurs", in RE 92. 2008, Techniques de l'Ingénieur.

[20] : P.-L.Taberna And D.Pech. " Micro-super condensateurs carbone-carbone de haute densité d'énergie ". Journées SEEDS 2010, France.

[21] : M.Belhadj, "Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome", Mémoire de Magister du Centre Universitaire de Bechar, 2008.

- [22] : I.Bendjamâa, "Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque ", Mémoire de Magister de l'Université de Abou-Bakr Belkaid – Tlemcen, 2012.
- [23] : F.Baghdadi, "Modélisation et simulation des performances d'une installation hybride de conversion d'énergies renouvelables ", Mémoire de Magister de l'Université Mouloud Mammeri de TIZI-OUZOU, 2011.
- [24] : O, Boukli-hacene, "Conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque mini d'un convertisseur MPPT pour une meilleure gestion énergétique ", Mémoire de Magister de l'Université de ABOU BAKR BELKAID-TLEMEN, 2011.
- [25] : D.Desmettre et F.Mattera "Petit mémento sur les batteries à usage solaire", CEA-GENEC, Avr.il 1998.
- [26] : J.Robert, and J.Alzieu, "Accumulateurs au plomb, in TI-d3352, Techniques de l'Ingénieur".
- [27] : G.Caillon, "Accumulateurs portables", in TI-e2140, Techniques de l'Ingénieur.
- [28] : F. Baghdadi, "Modélisation et simulation des performances d'une installation hybride de conversion d'Energies renouvelables", Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2011.
- [29] : T.Bayram " Etude comparative de groupes électrogènes embarqués à large gamme de vitesse variable associant machines à aimants permanents et conversion statique " thèse de doctorat, institut national polytechnique de Toulouse, France 2006.
- [30] : B.Planklang "An embedded interactive monitoring system for PV-Diesel hybrid plants in rural areas " université Kassel, Allemand, 2005.
- [31] : O.Amrani " Etude, simulation et réalisation d'une centrale hybride " Mémoire de magister, Université de Béjaia, 2006.
- [32] :G.Notton, M.Muselli and A.Louche, Autonomous hybrid photovoltaic power plant using a back-up generator: a case study in a Mediterranean Island. Renewable Energy, 7:4, 371-391, (1996).
- [33] : MK.Deshmukha, and SS.Deshmukh, "Modeling of hybrid renewable energy systems". Renewable and Sustainable Energy Review, 12, 235-249, (2008).

- [34] : M.Ashari and C.V.Nayar, "An optimum dispatch strategy using set points for a photovoltaic PV/Diesel/battery hybrid power system". Solar Energy, 66:1, 1-9, (1999).
- [35] : J. T. Bialasiewicz, E. Muljadi, S. Drouilhet and G. Nix "Modular Simulation of a Hybrid Power System with Diesel and Wind Turbine Generation " Windpower, Bakersfield, 1998.
- [36] : B.Wickert, C.V.Nayar and W.B.Lawrance, " Photovoltaic-diesel hybrid energy systems for off-grid rural electrification ", International Journal of Renewable Energy Engineering, 1:1, 7 - 17, (1999).
- [37] : G.V.Marcelo, R.G.Jonas, and R.F.Ernesto, " Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays ", IEEE transactions on power electronics, Vol. 24, No. 5, Mai 2009.
- [38] : A.F.Boehinger, "Self-adaptive DC converter for solar spacecraft power supply", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, pp. 102-111, 1968.
- [39] : M.R.Yaiche et A.Bouhanik, "Atlas solaire algérien", www.cder.dz, 2002.
- [40] : M.L.Elhafyani and F.Z.Kadda, "Optimal sizing of an Autonomous Hybrid System" , IEEE 2013.
- [41] : P.Mayé, "Problème corrigés d'électronique de puissance", Dunod , 2013.
- [42] : R.Akkaya, A.A.Kulaksız and O.Aydogdu, "DSP implementation of a PV system with GA-MLP-NN based MPPT controller supplying BLDC motor drive", www.sciencedirect.com, Energy Conversion and Management 48 (2007) 210–218.
- [43] : J.Y.Fabert, "Automatismes et Automatique, cours et exercices corrigés", Ellipses Edition, 2005.
- [44] : S.Aissou, D.Rekioua, N.Mezzai, T.Rekioua and S.Bacha, "Modeling and control of hybrid photovoltaic wind power system with battery storage", Energy Conversion and Management 89 (2015) 615–625.
- [45] : M.Adouane, M.Haddadi, A.Malek et M.Hadjjat, "Etude et conception d'un onduleur monophasé autonome géré par microcontrôleur pic 16F876A", Revue des Energies renouvelables, Vol.12 N°4, 2009.

[46] : <http://www.photovoltaique.guidenr.fr/cours-photovoltaique-autonome-1/inventaire-appareils-electriques.php>.

[47] : M.Effendy Ya'acob, H.Hizam, M.Amran, M.Radzi and M.Z.A.A.Kadir, "Field measurement of PV array temperature for tracking and concentrating 1kWp generators installed in malaysia", Hindawi publishing corporation, international journal of photoenergy, volume 2013, article ID 502503, P8, 2013.

Résumé

L'extension du réseau électrique, pour alimenter en électricité les habitations dans les régions isolées, est une option très coûteuse du fait que ces habitations ne sont pas nombreuses et dispersées sur différents coins. Le générateur diesel, est la solution la plus rencontrée dans ces zones rurales, mais le surcoût de l'approvisionnement en combustible reste un inconvénient majeur, vu son coût d'achat et de transport. Dans ce contexte, l'interconnexion de plusieurs sources d'énergie renouvelable ou conventionnelles (des éoliennes, des panneaux photovoltaïques, groupes électrogènes, des petites centrales hydroélectrique, etc.) dans un système hybride (SEH), peut avoir une incidence profitable sur la production d'énergie électrique, en terme de coût et de disponibilité.

Afin de rendre la technologie électrique hybride plus compétitive dans les régions isolée, il faut améliorer la conception et le fonctionnement de ces système dans l'objectif d'assurer une fiabilité, longévité et minimisé les coûts d'installations. Ainsi le travail de recherche présenté dans ce mémoire, est une contribution à la maîtrise des performances et optimisation de l'énergie dans un système hybride PV/Diesel, pour alimenter une habitation isolée, constitué par une source renouvelable, un générateur diesel et un dispositif de stockage par batteries électrochimiques. Ce type de système est conçu selon quatre aspects ; étude, dimensionnement, modélisation et maximisation d'utilisation de la source renouvelable.

Pour ce faire, le dimensionnement et le choix du fonctionnement des composants sont réalisés en tenant compte de la source énergétique disponible, ainsi que des contraintes d'utilisation. Ensuite, les modèles de simulations pour les sources du SEH, les éléments d'interconnexion et le système de stockage sont développés et réunis en schéma globale sous l'environnement (MATLAB/Simulink/SimPowerSystem), dans l'objectif de le simuler afin d'étudier et tester ces performances avant son installation. Les modèles de simulations, suffisamment précis, sont utilisés de manière à créer des scénarios de conditions plus proche de la réalité pratique.