



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued
Faculté de Technologie

Mémoire de Fin d'Étude
En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine: Technologie

Filière: Electrotechnique

Spécialité: Commande Electrique

Thème

Etude Comparative des Différent Type
de Stockage de l'Energie Photovoltaïque
pour l'Entrainement des Véhicule
solaires

Réalisé par :

 Djouadi Heithem

 Dehda Abdelkamel

Encadré par :

Mr.Allal Abderrahim

Co.ancadreur :

Khechekhouche Abderrahmane

Soutenu en Juin 2018

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Nous tenons à remercier tout premièrement Dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience , qu'il nous a donné durant toutes ces longues années .

Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur monsieur Allal Abderrahim pour avoir d'abord proposée ce thème, pour suivi continuél tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessée de nous donner ses conseils.

Nous remercions également tous les membres du jury d'avoir accepter du jurer ce travail.

Enfin, nos remerciement à toute personne ayant participée de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

*D. Heithem
D. Abdelkamel*

Dédicace

*Avant tout, je tien à remercies le bon dieu, et l'unique
qui m'offre le courage .
et la volonté nécessaire pour affronter les différentes de
la vie,*

Je dédie ce modeste travail

*A tous les membres famille grande et petit surtout ma
mère et mon père.*

*A mon collègues D.Abdelkamel .qui m'a accompagné
pendent le long de cette période pour réaliser ce modeste
travail*

A tous mes professeurs à tous les niveaux d'étude

*A tout mes amis surtout ,tahar ,m.seghir ,abbas ,khaled
,hani ,massoud ,hakim ,a.elghani ,saad ,adel.....etc*

A mes amis et mes collègues du promotion 2018

« 2 ème Master Commande électrique ».

*a tout ceux qui m'ont aidé, de prés ou de loin, même
qu'il soit un mot d'encouragement et de gentillesse
surtout Dr.Khechkouche A.errahmen et Dr.Hakima et
Fondation Regouta energy.*

a tout ceux que j'aime et qui m'aiment

a tous ceux qui connaissent DJOUADI HEITHEM

Thrahim_Mabhtar

Dédicace

*Avant tout, je tien à remercies le bon dieu, et l'unique
qui m'offre le courage .
et la volonté nécessaire pour affronter les différentes de
la vie,*

Je dédie ce modeste travail

*A tous les membres famille grande et petit surtout ma
mère et mon père.*

A Ma chère Fiancée.

*A mon collègue D.Heithem. qui m'a accompagné
pendant le long de cette période pour réaliser ce modeste
travail*

A tous mes professeurs à tous les niveaux d'étude

*A tout mes amis surtout ,bachir ,houcein ,Mel
arbi,soufein, brahime ,G.ali, M ahmed, et mes amis pour
travail ,*

A mes amis et mes collègues du promotion 2018

« 2 ème Master Commande électrique ».

*a tout ceux qui m'ont aidé, de près ou de loin, même
qu'il soit un mot d'encouragement et de gentillesse
surtout Dr.Khechkouche A.errahmen et Dr.Hakima et
Fondation Regouta energy.*

a tout ceux que j'aime et qui m'aiment

a tous ceux qui connaissent Dehda Abdelkamel

Sommaire

Remerciement	
Dédicace	
Liste des Figure	
Liste des Tableaux	
Résumé	
Introduction Générale	

Chapitre I : Energie Solaire Photovoltaïque

I.1. Introduction.....	3
I.2. Générateur Photovoltaïque.....	3
I.3. Historique du photovoltaïque.....	3
I.4. Principe de l'effet photovoltaïque.....	4
I.5. Cellule photovoltaïque	5
I.5.1. Généralités.....	5
I.5.2. Définition d'une cellule solaire.....	5
I.5.3. Composants cellules photovoltaïques.....	6
I.5.4. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire.....	6
I.6. Module photovoltaïque	7
I.7. Champ photovoltaïque.....	7
I.8. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque	8
I.9. Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque.....	8
I.9.1. Le courant de court-circuit (I_{cc}).....	9
I.9.2. Tension du circuit-ouvert (V_{co}).....	9
I.9.3. Facteur de forme	11
I.9.4. Rendement.....	12
I.10. Modélisation.....	12
I.10.1. Modélisation de la cellule solaire	12
I.11. La constitution d'un module photovoltaïque.....	14
I.12. Regroupement des cellules	16
I.12.1. Regroupement des cellules en série.....	16
I.12.2. Regroupement de cellules en parallèle.....	17
I.13. Le panneau solaire utilisé dans l'expérience	17
I.14. Modélisation d'un panneau photovoltaïque.....	19
I.15. Avantages et inconvénients du solaire photovoltaïque.....	22
I.15.1. Avantages	22
I.15.2. Inconvénients.....	23
I.16. Conclusion.....	23

Chapitre II : stockage énergie

II.1. Introduction.....	24
II.2. Stockage d'énergie	24
II.3. Accumulateurs électro- chimiques.....	24
II.3.1. Généralités.....	24
II.3.1.1. Définitions et paramètres utiles.....	25
II.3.1.1.1. Rendement d'utilisation.....	25
II.3.1.1.2. Résistance interne.....	26
II.3.1.1.3. Capacité	26
II.3.1.1.4. Capacité massique.....	27
II.3.1.1.5. Auto- décharge.....	27

II.3.1.1.6. Charge d'égalisation.....	27
II.3.1.1.7. Profondeur de décharge.....	27
II.3.1.1.8.Tenue en cycles.....	28
II.3.1.1.9. Durée de vie.....	28
II.3.1.1.10. Autonomie.....	28
II. 4. Accumulateur lithium – ion.....	28
II.4.1. Principe de fonctionnement.....	28
II.4.1.1. Aspect microscopique.....	28
II.4.1.2.Aspect microscopique électrochimie.....	29
II.4.2. Avantages et l' Inconvénients de la batterie au lithium.....	30
II.4.3. Charge et décharge.....	31
II.5. Accumulateurs au Plomb acide.....	31
II.5.1. Description.....	32
II.5.2. Principe de fonctionnement.....	32
II.5.2.1. Contraintes liées aux surcharges et aux décharges profondes.....	33
II.5.3.Caractéristiques.....	33
II.5.3.1.Tension.....	33
II.5.3.2.Rendement.....	34
II.5.3.3.Autodécharge.....	34
II.5.3.4.Durée de vie.....	34
II.6. Les accumulateurs Cadmium – Nickel.....	35
II.6.1. Description.....	35
II.6.2. Caractéristiques.....	35
II.7. Lithium Polymère (Li-Po).....	35
II.7.1 Histoire.....	35
II.7.2. Fonctionnement.....	36
II.7.3. Avantages et inconvénients des batteries Li-Po	36
II.8. Autres couples électro-chimiques.....	37
II.8.1. Nickel-Zinc.....	37
II.8.2. Nickel-Fer.....	37
II.8.3. Nickel NaCl.....	37
II.9. Batteries utilisées dans l'expérience.....	37
II.9.1. Charge batterie Li-Po.....	38
II.10.Conclusion.....	39

Chapitre III : Véhicule Solaire

III.1. Introduction	40
III.2. Notions de voitures électrique et solaire.....	40
III.2.1. Voiture électrique.....	40
III.2.2. Voiture solaire.....	40
III.3. Constituants de la voiture solaire-électrique.....	41
III. 3.1. Moteur	41
III.3.1.1. Principe de fonctionnement.....	41
III.3.1.2. Configurations.....	42
III.3.1.3. Rendement	44
III.3.2. Batterie	44
III.3.2.1. Types.....	44
III.3.2.2. Durée de vie.....	45
III.3.2.3. Système de charge.....	45

III.3.2.4. Isolation galvanique	46
III.3.2.5. Caractéristiques recherchées	46
III.3.3. Panneaux photovoltaïque	46
III.3.4. Autres accessoires	47
III.3.4.1. Régulateurs	47
III.3.4.2. Chargeur électrique	47
III.3.4.3. Boîtier d'interconnexion	47
III.3.4.4. Hacheurs.....	47
III.3.4.5. Convertisseurs.....	48
III.4. Basic diagramme fonctionnel.....	48
III.5. Les composants utilisés dans notre expérience.....	49
III.6. Travail du véhicule.....	51
III.7. Résultats expérimentaux	51
III.8. Avantages et les Inconvénients.....	55
III.8.1. Avantages.....	55
III.9. Conclusion.....	56

Listes des figures

Listes des Figures

Chapitre I : Energie Solaire Photovoltaïque

Figure .I.1 : Association de cellules PV	5
Figure .I.2: Structure d'une cellule photovoltaïque.....	6
Figure .I.3 : Module photovoltaïque.	7
Figure .I.4 : Champ photovoltaïque.....	7
Figure .I.5: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	8
Figure I.6: Caractéristique courant-tension et paramètres physiques d'une cellule photovoltaïque.....	9
Figure .I.7 : différents régimes selon la puissance d'éclairement.....	11
Figure .I.8: Schéma d'une cellule photovoltaïque et d'un panneau photovoltaïque	12
Figure .I. 9: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	13
Figure .I.10 : ruban métallique d'une cellule.....	14
Figure .I.11: Encapsulation des cellules	15
Figure .I.12 : caractéristiques résultantes d'un groupement de (Ns) cellules en séries	16
Figure .I.13 : caractéristiques d'un groupement de (Np) cellules en parallèle	17
Figure .I.14: Panneau Solaire	18
Figure .I.15 : caractéristiques Panneau Solaire.....	18
Figure .I.16 : Caractéristique courant-tension simulée pour le panneau photovoltaïque Pour une température de cellule de 25°C.....	19
Figure .I.17 : Caractéristique courant-tension simulée pour le panneau photovoltaïque Pour une température de cellule de 35°C.....	19
Figure .I.18 : Caractéristique courant-tension simulée pour le panneau photovoltaïque Pour une température de cellule de 50°C.....	20
Figure .I.19 : Caractéristique courant-tension simulée pour le panneau photovoltaïque Pour une température de cellule de 60°C.....	20
Figure .I.20 : Caractéristique courant-tension simulée pour le panneau photovoltaïque Pour une température de cellule de 70°C.....	20
Figure .I. 21: Caractéristique puissance-tension simulées pour le panneau photovoltaïque différentes valeurs de G et pour une température de cellule de 25°C.....	21
Figure .I.22 : Caractéristique puissance-tension simulées pour le panneau photovoltaïque différentes valeurs de G et pour une température de cellule de 35°C.....	21

Figure .I.23 : Caractéristique puissance-tension simulées pour le panneau photovoltaïque différentes valeurs de G et pour une température de cellule de 50°C	21
Figure .I.24 : Caractéristique puissance-tension simulées pour le panneau photovoltaïque différentes valeurs de G et pour une température de cellule de 60°C	22
Figure .I.25 : Caractéristique puissance-tension simulées pour le panneau photovoltaïque différentes valeurs de G et pour une température de cellule de 70°C	22

Chapitre II : Stockage Energie

Figure .II.1 : Caractéristique de décharge type d'une batterie au Plomb de 100 Ah.....	26
Figure .II.2: Tension de charge des accumulateurs.....	34
Figure .II.3: principe de fonctionnement.....	36
Figure .I.4: Charge simulée d'un Li-PO.....	38
Figure .I.5: Charge expérimentale batterie Li-Po.....	38

Chapitre III : Véhicule Solaire

Figure .III.1 : Schéma du moteur électrique.....	41
Figure .III.2 : Règle des trois doigts de la main droite.....	41
Figure .III.3 : Moteur électrique simplifié.....	42
Figure .III.4 : Schéma de moteur électrique avec la force de Laplace.....	42
Figure .III.5 : Implantation des éléments d'une voiture électrique à traction avant.....	43
Figure .III.6 : Implantation des éléments d'une voiture électrique à propulsion.....	43
Figure .III.7 : Implantation des éléments d'une voiture électrique, moteurs dans les Moyeux.....	43
Figure .III.8 : Exemple de moteur incorporé au moyeu : « Active Wheel » de Michelin Heulliez.....	44
Figure .III.9 : Exemple de charge par induction.....	45
Figure .III.10: Bloc de base Schéma Représentation du véhicule solaire.....	48
Figure .III.11: Représentation di grammatique du panneau et des connexions du panneau...49	49
Figure.III.12 : voiture solaire avec Batterie Li-Po.....	52
Figure .III.13 : voiture solaire avec Batterie Li-Po.....	52
Figure .III.14 : voiture solaire avec Batterie Li-Po.....	53
Figure .III.15: Voiture Solaire.....	56

Liste du Tableau

Chapitre II : Stockage Energie

Tableau :II.1. Détails sur la batterie.....	38
--	----

Chapitre III : Véhicule Solaire

Tableau .III.1: Les composants utilisés dans notre expérience.....	50
Tableau .III.2: comparaison en surface plane.....	53
Tableau .III.3: comparaison en pente.....	53
Tableau .III.4: comparaison en haut.....	53
Tableau .III.5: comparaison en durée de vie des batteries.....	54

Résumé :

Dans ce travail, nous présentons une étude détaillée sur l'énergie photovoltaïque (ses caractéristiques, le principe de son fonctionnement), comment le stocker dans différents types de batteries, avec la meilleure façon de l'exploiter dans le fonctionnement d'une voiture électrique.

L'étude a inclus toutes les batteries (lithium, nickel cadmium, plomb, etc.), en notant les propriétés de chacune. Nous avons également fait de nombreuses comparaisons en termes de vitesse, d'âge et d'autres, ce qui fait que la batterie au lithium était la meilleure pour le premier opérateur.

Nous avons ensuite simulé notre petite voiture avec une grosse voiture et nous l'avons comparée de plusieurs façons, nous avons constaté qu'à l'avenir nous pourrions créer une voiture de grande taille qui fonctionne normalement, selon les études de cette recherche.

Mots clés : Energie Photovoltaïque - Stockage D'énergie - Batterie - Véhicule Solaire

Introduction Générale

Introduction Générale :

Nous sommes au début du vingt-et-unième siècle, le siècle où la demande mondiale d'énergie et de ressources de base comme le pétrole, le gaz ou l'uranium diminue. Cependant, une grande partie de l'énergie utilisée dans le monde d'aujourd'hui provient de gisements de combustibles fossiles tels que le pétrole, qui fournit 37% de la consommation d'énergie dans le monde, et le charbon, qui fournit 25% du gaz ou de 24%. Nous devons faire face à un grave problème d'énergie. De plus, ces sédiments se sont formés avec le temps et l'évolution géologique est clairement limitée en quantité: ils peuvent s'effondrer.

Dans ce contexte, l'énergie solaire est un important programme d'études où l'Algérie dispose d'énormes ressources solaires sur son territoire. Les capteurs photovoltaïques ont connu une baisse récente des coûts de production grâce à de nouveaux procédés de fabrication, ce qui permettra un développement rapide des systèmes de panneaux solaires.

Dans le cadre de sa stratégie énergétique, l'Algérie privilégie le développement des énergies renouvelables et le développement durable. L'Algérie est stratégiquement située au cœur du centre énergétique.

Pouvons-nous compter sur l'énergie solaire pour remplacer toutes les sources d'énergie fossiles dans toutes les zones générales. Dans le domaine de l'exploitation de voitures solaire privées?

Notre objectif est de développer un plan d'affaires qui traite de l'exploitation de l'énergie photovoltaïque et de son exploitation dans l'industrie de la voiture solaire et d'en exploiter ou d'en exploiter une grande partie .

Cette réalisation nous permet de démontrer la faisabilité du maintien de cette qualité énergétique et la possibilité de produire des voitures solaires de classe mondiale.

Nous avons donc divisé les trois chapitres:

Dans le premier chapitre, nous fournirons une étude détaillée sur l'énergie photovoltaïque, ses composants et ses caractéristiques, en plus de son principe de fonctionnement.

Dans le deuxième chapitre, nous allons parler de stocker l'énergie photovoltaïque dans différents types de batteries avec certaines caractéristiques de chacun.

Dans le troisième chapitre, nous montrons comment utiliser l'énergie PV pour faire fonctionner une voiture solaire.

Chapitre I

Energie solaire photovoltaïque

I.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous décrivons, en premier lieu, le principe de fonctionnement des cellules solaires ainsi que leurs caractéristiques principales. Dans la deuxième partie, nous étudions les différentes technologies des cellules solaires ainsi que la mise en œuvre des modules photovoltaïques.

I.2. Générateur Photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière.

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés délivre, au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au un volt.

Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un champ photovoltaïque. La connexion en série des cellules permet d'augmenter facilement la tension de l'ensemble, tandis que la mise en parallèle permet d'accroître le courant. Le câblage série/parallèle est donc utilisé pour obtenir globalement un générateur PV aux caractéristiques souhaitées [1].

I.3. Historique du photovoltaïque:

Découvert en 1839 par Antoine Becquerel, l'effet photovoltaïque permet la transformation de l'énergie lumineuse en électricité. Ce principe repose sur la technologie des semi-conducteurs. Il consiste à utiliser les photons pour libérer les électrons et créer une différence de potentiel entre les bornes de la cellule qui génère un courant électrique continu. L'héliogénéricité est apparue en 1930 avec les cellules à oxyde cuivreux puis au sélénium. Mais ce n'est qu'en 1954, avec la réalisation des premières cellules photovoltaïques au silicium dans les laboratoires de la compagnie Bell Téléphone, que l'on entrevoit la possibilité de fournir de l'énergie. Très rapidement utilisées pour l'alimentation des véhicules spatiaux vers les années 60 avec l'équipement de satellites spatiaux. Puis à partir de 1970, les premières utilisations terrestres ont concerné l'électrification des sites isolés. Au cours des années 80, la technologie

photovoltaïque terrestre a progressé régulièrement par la mise en place de plusieurs centrales de quelques mégawatts, et est

même devenue familière des consommateurs à travers de nombreux produits de faible puissance y faisant appel : montres, calculatrices, balises radio et météorologiques, pompes et réfrigérateurs solaires.

Le progrès des techniques de production de cellules photovoltaïques ainsi que l'augmentation des volumes de production ont entraîné, à partir des années 1990, une baisse des prix. La production de modules se fait en Chine (près de 60 % de la production totale), au Japon, aux EU, en Allemagne et en Europe, avec en particulier des grandes companies comme Yingli Green Energy, First Solar et Suntech Power. La production mondiale de modules photovoltaïques est passée de 5 MWc en 1982 à plus de 18GWc en 2013. Concernant l'Algérie, le groupe algérien Condor Electronics, s'est lancé en juillet 2013 dans la production des panneaux photovoltaïques dont la puissance varie entre 70 W et 285 W et à des prix compétitifs. Dans le cadre de la concrétisation du programme national algérien des énergies renouvelables, un projet de 400 MW en photovoltaïque à été lancé, faisant partie du programme complémentaire de production de l'électricité, prévu pour l'été 2014. Ce projet consiste en la réalisation de 23 centrales solaires photovoltaïques, dans la région des hauts plateaux et dans la région du sud ouest; ainsi que dans la région du grand sud. Dans la dizaine d'années qui viendront, il est prévu la réalisation d'un parc d'énergies renouvelables de 5539 MW. L'objectif à 2030 est de 12 000 MW en énergies renouvelable pour la consommation interne d'électricité. La puissance photovoltaïque installée cumulée dans le monde a atteint 138,9 GW à la fin 2013[2].

I.4. Principe de l'effet photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques (photon : grain de lumière et volt: unité de tension) convertissent directement l'énergie lumineuse en électricité courant continu basse tension. Comme l'énergie lumineuse est le soleil, on parle alors de cellules solaires. On distingue deux types de panneaux solaires :

- Les panneaux solaires thermiques, appelés capteurs solaires thermiques, qui convertissent la lumière en chaleur récupérée et utilisée sous forme d'eau chaude.
- Les panneaux solaires photovoltaïques, appelés modules photovoltaïques, qui convertissent la lumière en électricité. Le solaire photovoltaïque est communément appelé PV. Dans les deux cas, les panneaux sont habituellement plats, d'une surface approchant plus ou moins le

m² pour faciliter et optimiser la pose. Les panneaux solaires sont les composants de base de la plupart des équipements de production d'énergie solaire.

I .5. Cellule photovoltaïque

I.5.1. Généralités

La cellule photovoltaïque ou encore photopile est l'élément constitutif des modules photovoltaïques. Dans les conditions standard STC, la puissance maximale pour une cellule au silicium de 10 cm² serait d'environ 1.25 W. La cellule photovoltaïque élémentaire constitue donc un générateur électrique de très faible puissance insuffisant pour la plupart des applications domestiques ou industrielles. Les générateurs photovoltaïques sont, de ce fait, réalisés par association, en série et/ou en parallèle d'un grand nombre de cellules élémentaires. Ces groupements sont appelés modules, puis panneaux. La figure I.1 illustre un exemple d'association de cellule PV afin d'obtenir un panneau photovoltaïque.

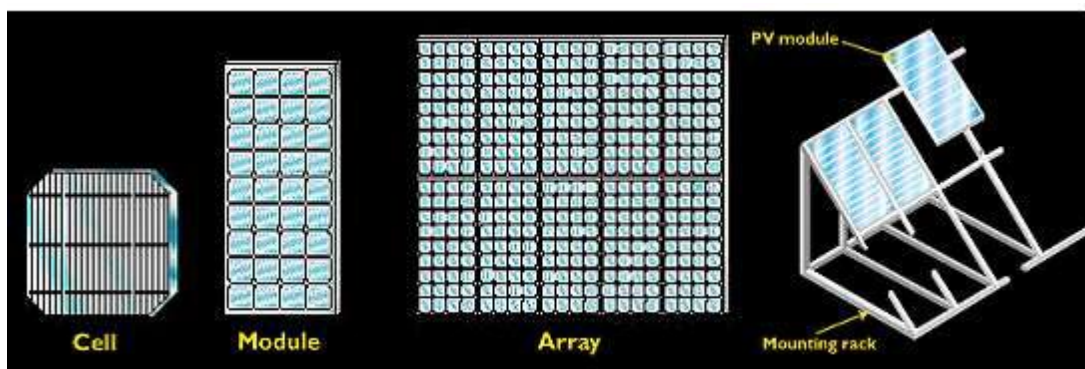


Figure .I.1 : Association de cellules PV

Une cellule photovoltaïque (PV) fonctionne selon le phénomène physique appelé «*effet photovoltaïque*» établissant une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée dépend de plusieurs facteurs, elle peut aller de 0,3 V à 0,7 V en fonction du matériau utilisé, de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule. Si une cellule n'est pas connectée à un circuit extérieur elle présente une tension nommée tension de circuit ouvert (V_{oc}) fortement dépendante de la température ambiante notée T_a . D'autre part, le courant maximal PV est atteint lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées. On parle alors de courant de court-circuit noté I_{cc} dépendant fortement du niveau d'éclairement noté G [3].

I .5.2. Définition d'une cellule solaire

est l'unité de base qui permet de convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique et le plus petit élément d'une installation photovoltaïque

I .5.3. Composants cellules photovoltaïques

Elle est composée de matériau semi-conducteur et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques sont constituées :

- D'une fine couche semi-conductrice (matériau possède une bande interdite, qui joue le rôle de la barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.
- D'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode.
- Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement [4].

I .5.4. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire

Les cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir d'une jonction PN au silicium (diode). Pour obtenir du silicium dopé N, on ajoute du phosphore. Ce type de dopage permet au matériau de libérer facilement des électrons (charge -).

Pour obtenir du silicium dopé P, on ajoute du bore. Dans ce cas, le matériau crée facilement des lacunes électroniques appelées trous (charge +).

La jonction PN est obtenue en dopant les deux faces d'une tranche de silicium. Sous l'action d'un rayonnement solaire, les atomes de la jonction libèrent des charges électriques de signes opposés qui s'accumulent de part et d'autre de la jonction pour former un générateur électrique[14].

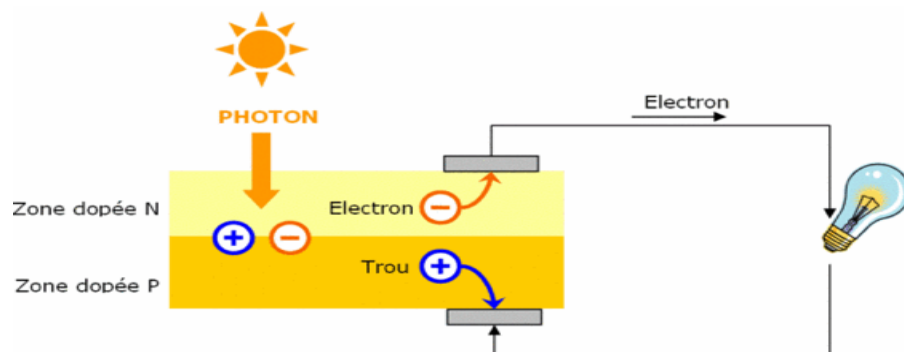


Figure .I.2: Structure d'une cellule photovoltaïque

I .6. Module photovoltaïque :

Le composant le plus crucial de toute installation PV est le module photovoltaïque, qui se compose de cellules solaires interconnectées. Ces modules sont raccordés entre eux pour former des champs de manière à pouvoir satisfaire différents niveaux de besoins en énergie. La figure 1.3 représente un module photovoltaïque. Des modules de plus en plus puissants sont disponibles sur le marché, en particulier pour la connexion du réseau, mais il y a tout de même une limite liée au poids et à la manipulation.[1]



Figure .1.3 : Module photovoltaïque.

I.7. Champ photovoltaïque:

Le champ photovoltaïque se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique. La figure 1.4 représente un champ photovoltaïque[1].



Figure .1.4 : Champ photovoltaïque

I.8. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque :

Le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque comprend un générateur de courant qui modélise l'éclairement et une diode en parallèle qui modélise la jonction PN. Mais le schéma

équivalent réel tient compte de l'effet résistifs parasites dus à la fabrication, il est représenté sur le schéma équivalent par deux résistances.

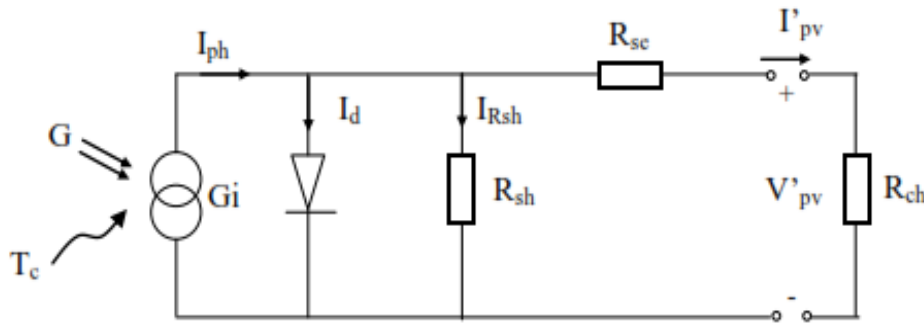


Figure .I.5: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

Avec :

G_i : Source de courant parfaite.

R_{sh} : Résistance shunt qui prend en compte les fuites inévitables de courant qui intervient entre les bornes opposées positive et négative d'une cellule.

R_{se} : Résistance série qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours (résistance de contact)

D : Diode matérialisant le fait que le courant ne circule que dans un seul sens.

R_{ch} : Résistance qui impose le point de fonctionnement sur la cellule en fonction de sa caractéristique courant-tension à l'éclairement considéré[2].

I.9. Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque:

Il existe de nombreux paramètres qui permettent de caractériser une cellule solaire. Ces paramètres sont appelés paramètres photovoltaïques et sont déduits de la caractéristique $I(V)$. La figure I.6 représente une caractéristique courant-tension $I(V)$ dans le noir et sous illumination typique d'une cellule photovoltaïque à jonction PN. Le tracé de cette courbe permet d'accéder à bon nombre de paramètres physiques caractéristiques du composant. Les premiers paramètres qui apparaissent sur la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque sont le courant de court circuit (I_{cc}), la tension à circuit ouvert (V_{co}) et le facteur de forme FF du composant.

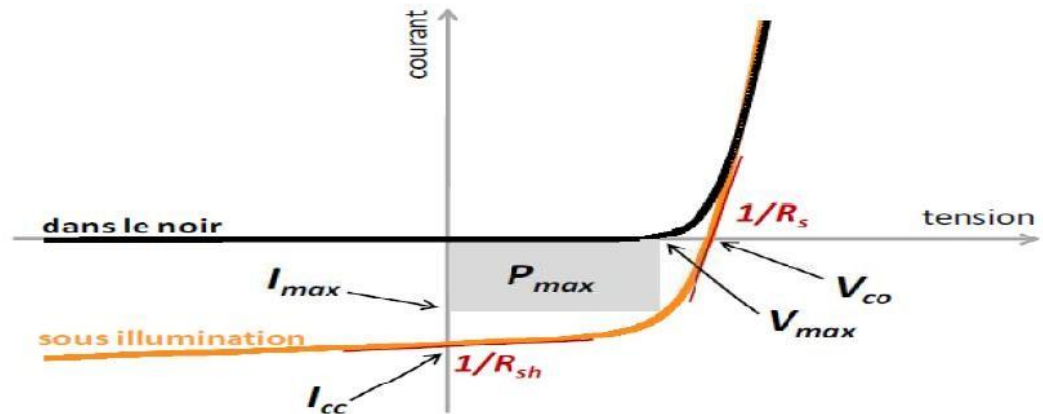


Figure I.6: Caractéristique courant-tension et paramètres physiques d'une cellule photovoltaïque.

I.9.1. Le courant de court-circuit (I_{cc}):

Il s'agit du courant lorsque le potentiel appliqué à la cellule est nul. C'est le plus grand courant que la cellule peut fournir. Celui-ci est en fonction de la température, de la longueur d'onde du rayonnement, de la surface activée de la cellule, de la mobilité des porteurs. Ce courant est linéairement dépend de l'intensité lumineuse reçue .

I.9.2. Tension du circuit-ouvert (V_{co}):

Comme son nom l'indique, c'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance infinie. Elle dépend essentiellement du type de cellule solaire (jonction PN, jonction Schottky), des matériaux de la couche active et de la nature des contacts de la couche active-électrode. Elle dépend de plus de l'éclairement de la cellule .

$$V_{co} = \frac{K_{TC}}{q} \cdot \text{Log} \frac{I_{PH}}{I_S} + 1 \quad (I.1)$$

Avec :

$\frac{K_{TC}}{q}$: représentant le potentiel thermodynamique. K : la constante de Boltzmann ($1,381 \cdot 10^{-23}$ Joules/Kelvin).
 q : la charge d'un électron.

T_c : la température absolue.

I_S : le courant de saturation.

I_{PH} : le courant photonique

Deux régimes peuvent être observés suivant le degré d'éclairement figure I.4.

- Régime des faibles flux lumineux : dans ce cas, $I_{ph} \ll I_S$, ce qui permet d'écrire :

$$\text{Log} \frac{I_{PH}}{I_S} + 1 = \frac{I_{PH}}{I_S}$$

D'où :

$$V_{co} \approx \frac{K T_c}{q} \cdot \frac{I_{PH}}{I_S} \quad (I.2)$$

C'est la zone de comportement linéaire de la cellule, la formule précédente peut s'écrire aussi

$$C_O = R_0 \cdot I_{ph} \quad (I.3)$$

V en posant

$$R_0 = \frac{K T_c}{q \cdot I_S}$$

R_0 : est la résistance interne de la diode en polarisation externe nulle (circuit ouvert) est sous faible flux lumineux.

- Régime des flux lumineux suffisamment intenses pour que $I_{ph} \gg I_S$, soit [9] :

$$\frac{I_{PH}}{I_S} \gg 1$$

D'où :

$$V_{co} = \frac{K T_c}{q} \log \frac{I_{PH}}{I_S} \quad (I.4)$$

C'est le domaine du comportement logarithmique (figure I.7) :

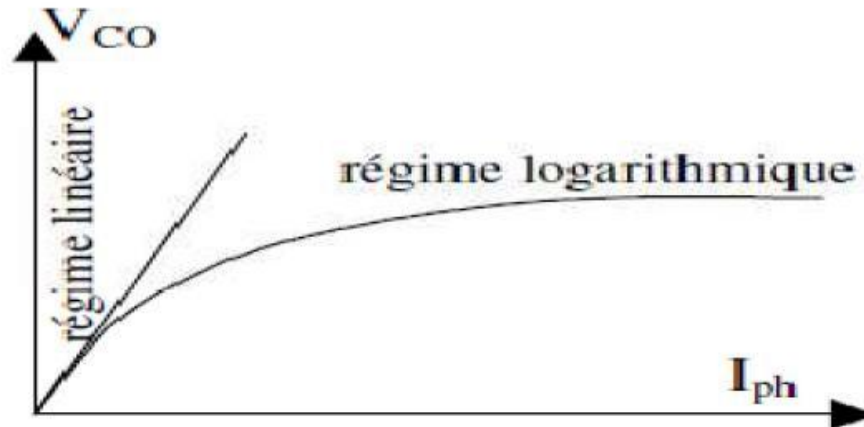


Figure .I.7 : différents régimes selon la puissance d'éclairement.

Il est important de remarquer que cette tension augmente avec le log d' I_{ph} , donc avec le log de l'illumination. En revanche, elle décroît avec la température, malgré le terme KT_c/q . en effet, le courant de saturation, I_s dépend de la surface de la diode (donc de la cellule) et des caractéristiques de la jonction : il varie exponentiellement avec la température et cette dépendance en température compense largement le terme KT_c/q . donc la tension de circuit ouvert V_{co} baisse avec la température, ce qui est important dans le dimensionnement des systèmes.

I.9.3. Facteur de forme :

Un paramètre important souvent utilisé à partir de la caractéristique $I(V)$ pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV : c'est le facteur de remplissage ou « fill factor (FF) ». Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{max} et la puissance formée par le rectangle $I_{cc} \cdot V_{co}$. Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable ne le sera également. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales. Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (I.5)$$

La puissance des modules photovoltaïque s'exprime en Watts-Crète. Cette dernière représente la puissance qui peut fournir un module lorsqu'il est fermé sur sa charge nominale (optimale), sous un éclairement de 1000W/m^2 et à une température de 25°C .

I.9.4. Rendement

Le rendement η des cellules PV désigne le rendement en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{co}}{P_{in}} \quad (I.6)$$

lumineuse incidente P_{in} : Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. Le rendement de conversion est un paramètre essentiel. En effet, la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule.[4]

I.10. Modélisation:

I.10.1. Modélisation de la cellule solaire :

Le circuit d'une cellule solaire est équivalent à une source de courant en parallèle avec une diode. Le courant de la sortie de la source est directement proportionnel à la lumière tombante sur la cellule (photo courant I). Pendant l'obscurité, la cellule solaire n'est pas un dispositif actif, il fonctionne comme une diode, c'est à dire une jonction P.N. Pour augmenter la sophistication, la précision et la complexité au modèle il faut introduire les éléments qui nous donnent une image la plus proche à la réalité.

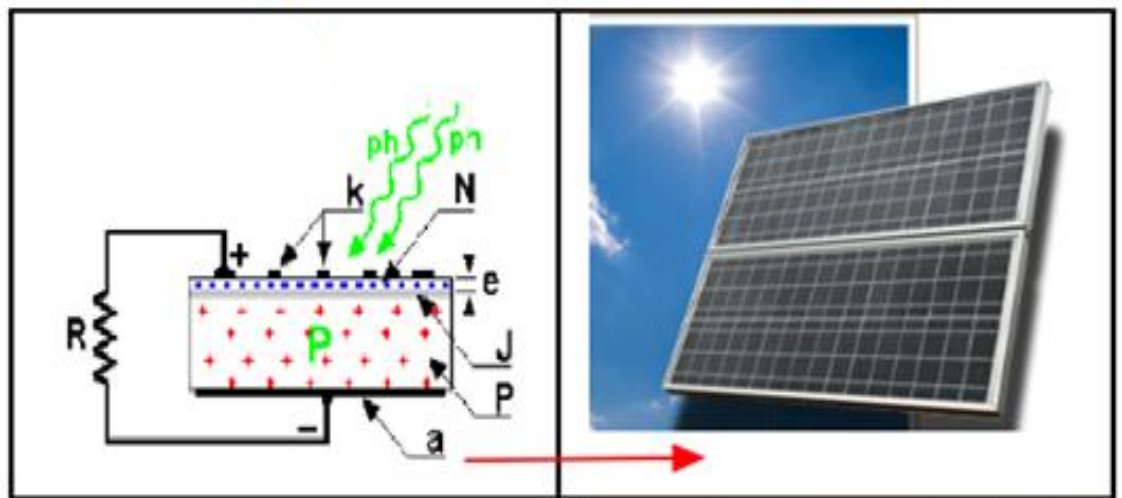


Figure .I.8: Schéma d'une cellule photovoltaïque et d'un panneau photovoltaïque

La diode modélise le comportement de la cellule dans l'obscurité. Le générateur de courant modélise le courant I_L généré par un éclairage. Enfin, les deux résistances modélisent les pertes internes : Résistance série

R_s (modélise les pertes ohmiques du matériau), Résistance shunt R_{sh} (modélise les courants parasites qui traversent la cellule) .Le schéma équivalent de la Figure. 2 correspondant est celui de la cellule idéale :

I_{ph} : photo-courant, ou courant généré par l'éclairement (A) .

n : le facteur de qualité de diodes.

I_0 : courant de saturation de la diode (A)

k : constante de Boltzmann ($k = 1,38.10^{-23}$)

q : charge de l'électron ($q = 1,602.10^{-19}$ C)

T : température de la cellule ($^{\circ}K$)

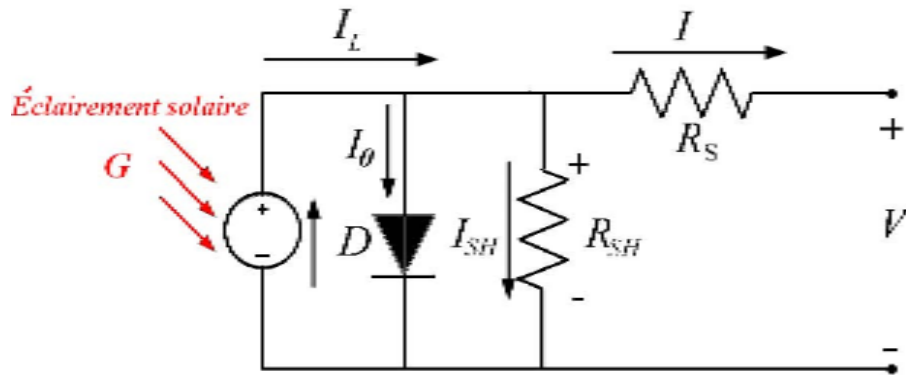


Figure .I. 9: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

Dans une cellule idéale $R_s = R_{sh} = 0$, en utilisant une hypothèse simplificatrice. Dans cet article, un modèle qui a un degré de complexité supérieur, a été utilisé. Le courant net de la cellule est la différence du courant photoélectrique, I_L et le courant de diode normale I

$$I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{q(V + IR_s)}{nkT}} - 1 \right) \quad (I.7)$$

Le modèle dépend de la température de la cellule qui influe sur le photo-courant I_L et le courant de saturation de la diode à I_0 [11].

$$I_L = I_L(T_1) + K_0(T - T_1)$$

$$I_L(T_1) = I_{SC}(T_{1,nom}) \frac{G}{G_{(nom)}}$$

$$I_L = I_L(T_1) + K_0(T - T_1) \quad (I.8)$$

$$K_0 = \frac{I_{Sc}(T_2) - I_{Sc}(T_1)}{(T_2 - T_1)} \quad (I.9)$$

$$I_0 = I_0(T_1) * \left[\frac{T}{T_1}\right]^{3/n} e^{\frac{qV_q(T_1)}{nk \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_1}\right)}}$$

$$I_0(T_1) = e^{\frac{I_{Sc}(T_1)}{\left(\frac{qV_{oc}(T_1)}{nk(T_1)} - 1\right)}} \quad (I.10)$$

$$R_S = \frac{dv}{dI_{voc}} - \frac{1}{X_V} \quad \text{avec} \quad X_V = I_0(T_1) \frac{q}{nkT_1} e^{\frac{qV_{oc}(T_1)}{nk(T_1)}} - \frac{1}{X_V} \quad (I.11)$$

I.11. La constitution d'un module photovoltaïque

Câble des cellules photovoltaïques: les cellules sont connectées entre elles par un fin ruban métallique (cuivre étamé), du contact en face avant (-) au contact en face arrière (+) (figure I.10).



Figure I.10 : ruban métallique d'une cellule.

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

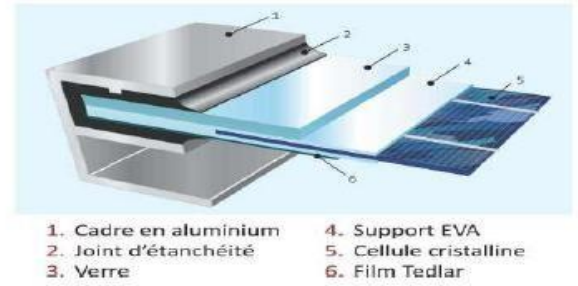
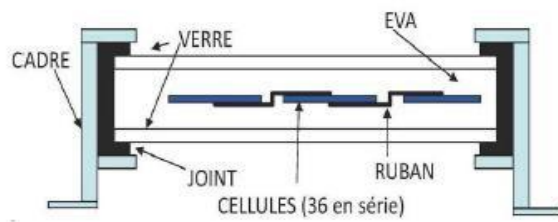


Figure .I.11: Encapsulation des cellules

La boîte de connexion étanche regroupe les bornes de raccordement, les diodes by-pass. Les deux câbles unipolaires sont raccordés.

En associant les cellules PV en série (somme des tensions de chaque cellule), ou en parallèle (somme des intensités de chaque cellule), on peut constituer un générateur selon les besoins des applications visées. Les deux types de regroupement sont en effet possibles et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaités. Ainsi, pour N_s cellules en série, constituant des branches elles même N_p en parallèles, la puissance disponible en série du générateur PV est donnée par :

$$P_{pv} = N_s \cdot V_{pv} \cdot N_p \cdot I_{pv} \quad (I.12)$$

Avec:

P_{pv} : la puissance disponible en sortie du Générateur Photovoltaïque.

V_{pv} : la tension à la sortie du Générateur Photovoltaïque.

I_{pv} : le courant de sortie du Générateur Photovoltaïque [4].

I.12. Regroupement des cellules

I.12.1. Regroupement des cellules en série

Une association de (N_s) cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV) [6]. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultante de groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, un tel regroupement est représenté par la figure I.12. L'équation résume les caractéristiques électriques d'une association série de (N_s) cellules [6].

$$V_{coNs} = N_s * V_{co} \quad ; \quad I_{cc} = I_{ccNs} \quad (I.13)$$

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

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

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

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

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

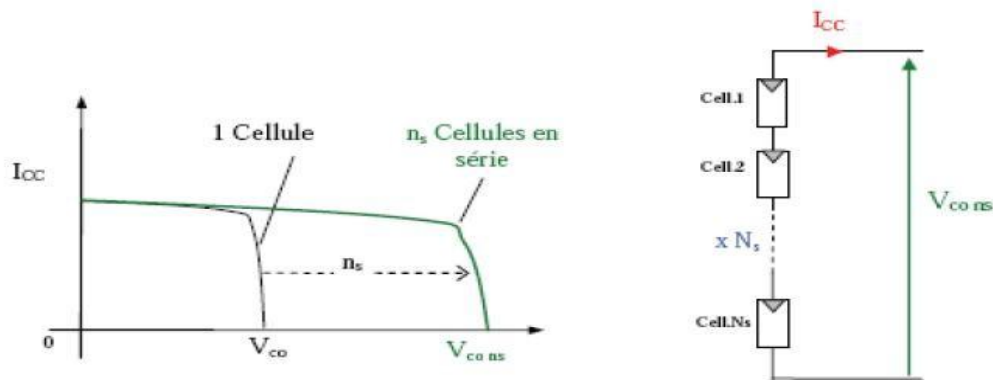


Figure .I.12 : caractéristiques résultantes d'un groupement de (N_s) cellules en séries

I.12.2. Regroupement de cellules en parallèle

Une association parallèle de (N_p) cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créée. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants. L'équation (I.14) et la figure I.13 résument les caractéristiques électriques d'une association parallèle de (N_p) cellules.

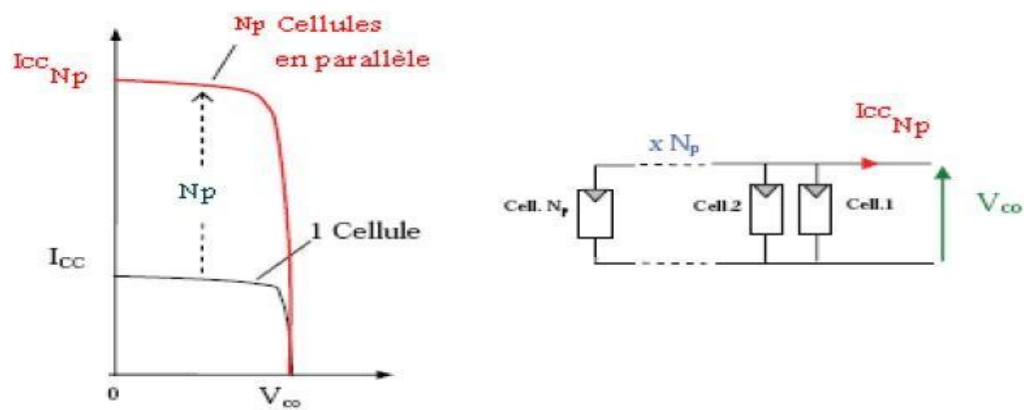


Figure I.13 : caractéristiques d'un groupement de (N_p) cellules en parallèle

Avec :

$$I_{ccNp} = N_p * I_{cc} ; V_{co} = V_{coNp}$$

(I.14)

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

V_{coNp} : tension du circuit ouvert de (N_p) cellules en parallèle. [4]

I.13. Le panneau solaire utilisé dans l'expérience :

Nous avons utilisé un panneau solaire GDLITE avec les caractéristiques montrées dans les images ci-dessous



Figure .I.14: Panneau Solaire

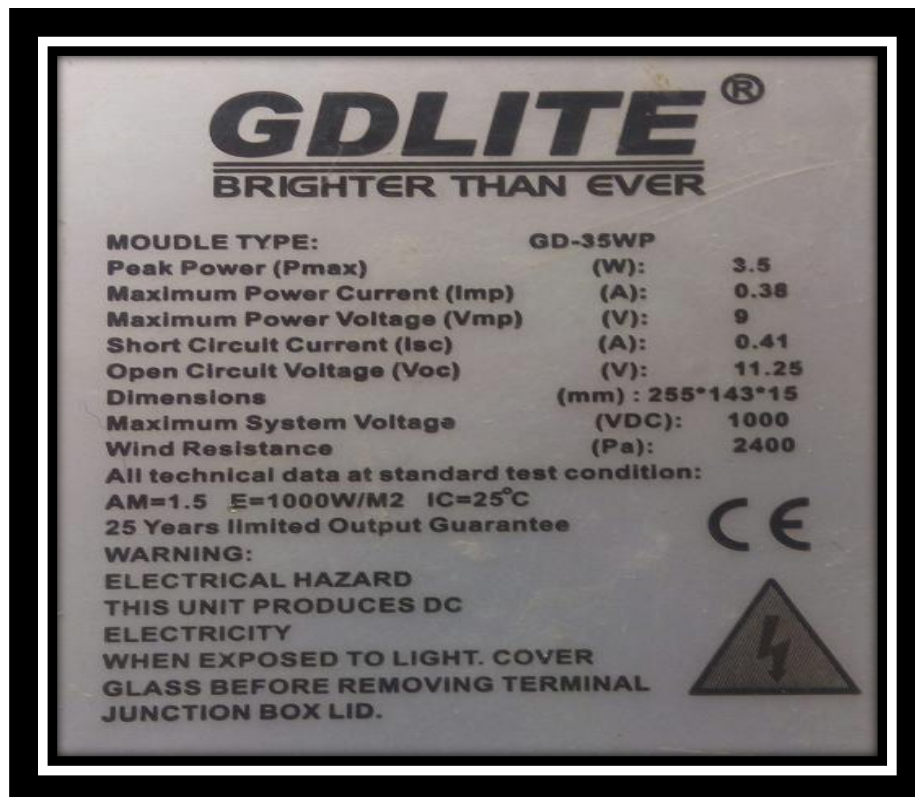


Figure .I.15 : caractéristiques Panneau Solaire

I.14. Modélisation d'un panneau photovoltaïque:

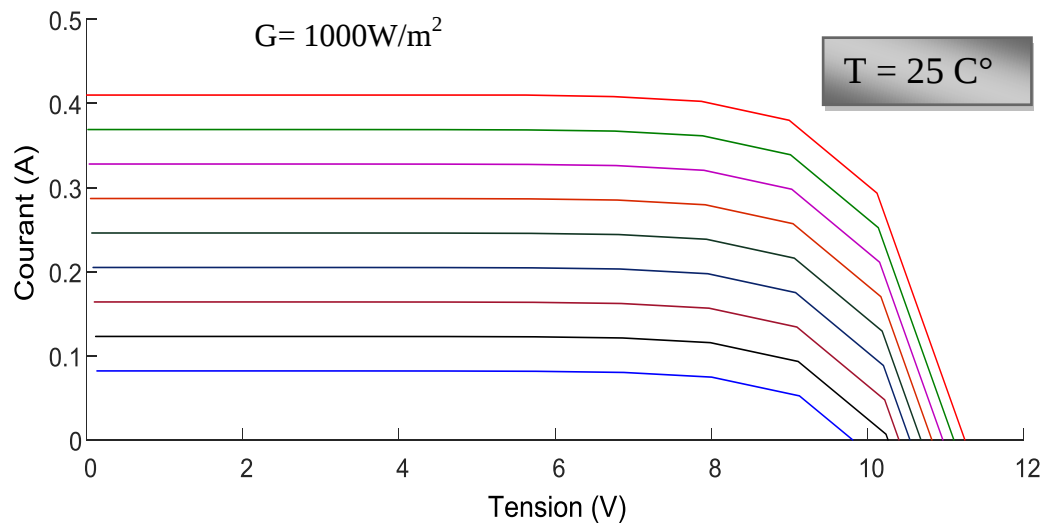


Figure .I.16 :Caractéristique courant-tension simulée pour le panneau photovoltaïque
Pour une température de cellule de 25°C .

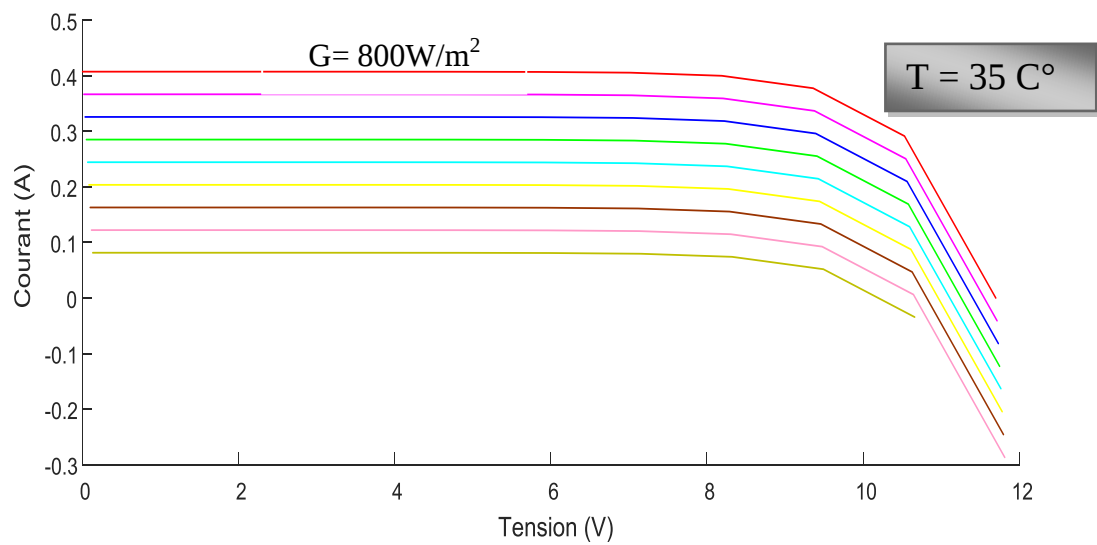


Figure .I.17 :Caractéristique courant-tension simulée pour le panneau photovoltaïque
Pour une température de cellule de 35°C .

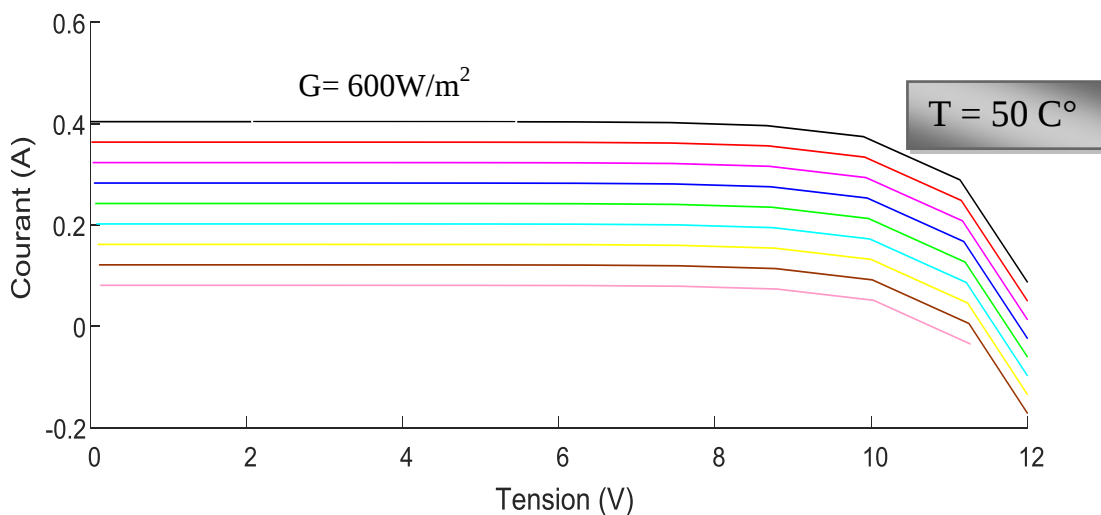


Figure .I.18 :Caractéristique courant-tension simulée pour le panneau photovoltaïque
Pour une température de cellule de 50°C .

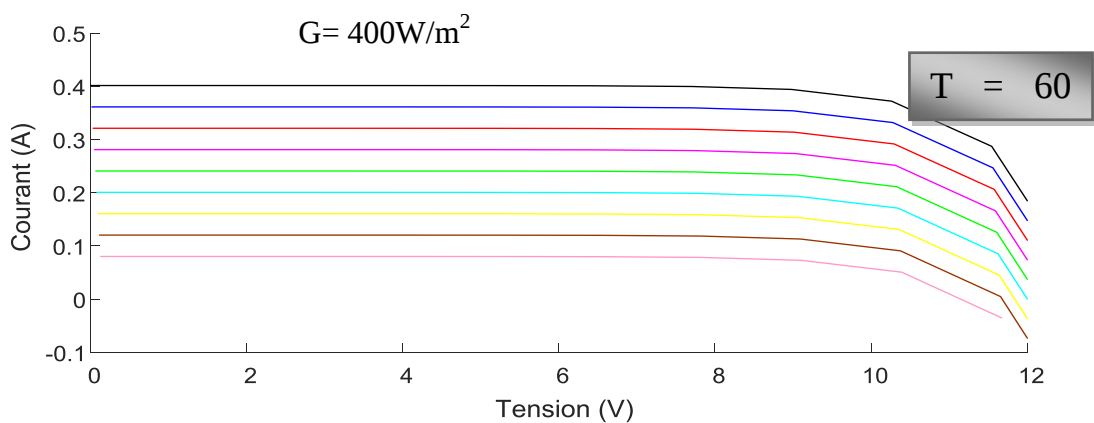


Figure .I.19 :Caractéristique courant-tension simulée pour le panneau photovoltaïque
Pour une température de cellule de 60°C .

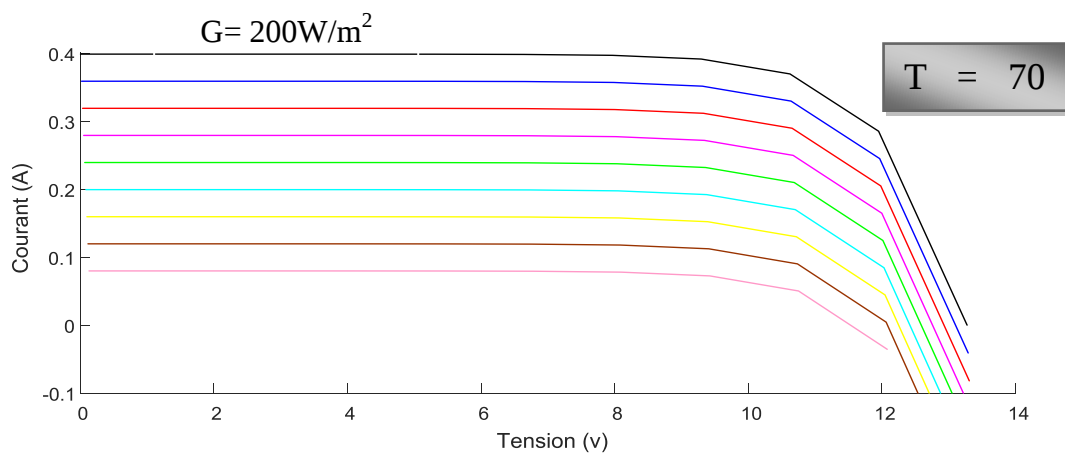


Figure .I.20 :Caractéristique courant-tension simulée pour le panneau photovoltaïque
Pour une température de cellule de 70°C .

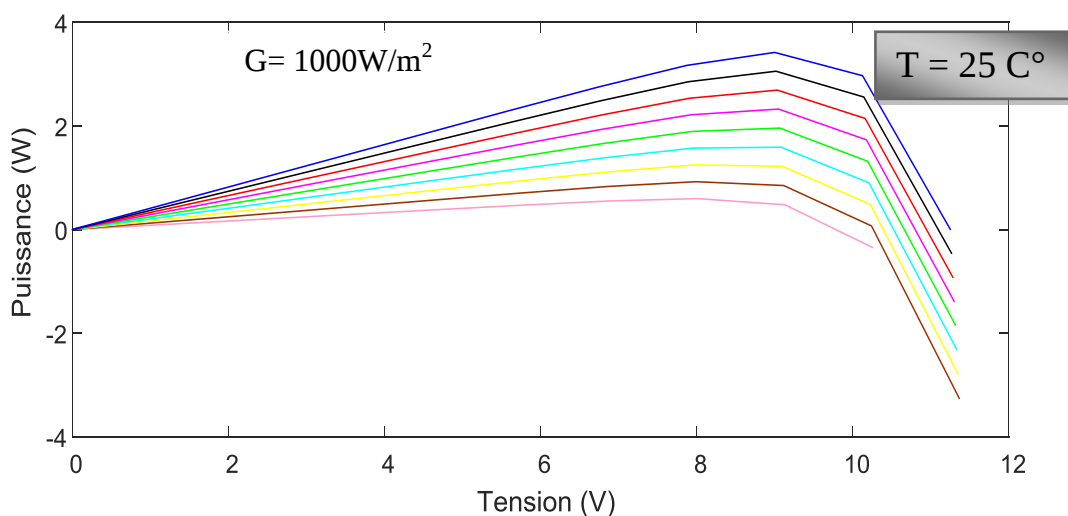


Figure I. 21: Caractéristique puissance-tension simulées pour le panneau photovoltaïque différentes valeurs de G et pour une température de cellule de 25°C

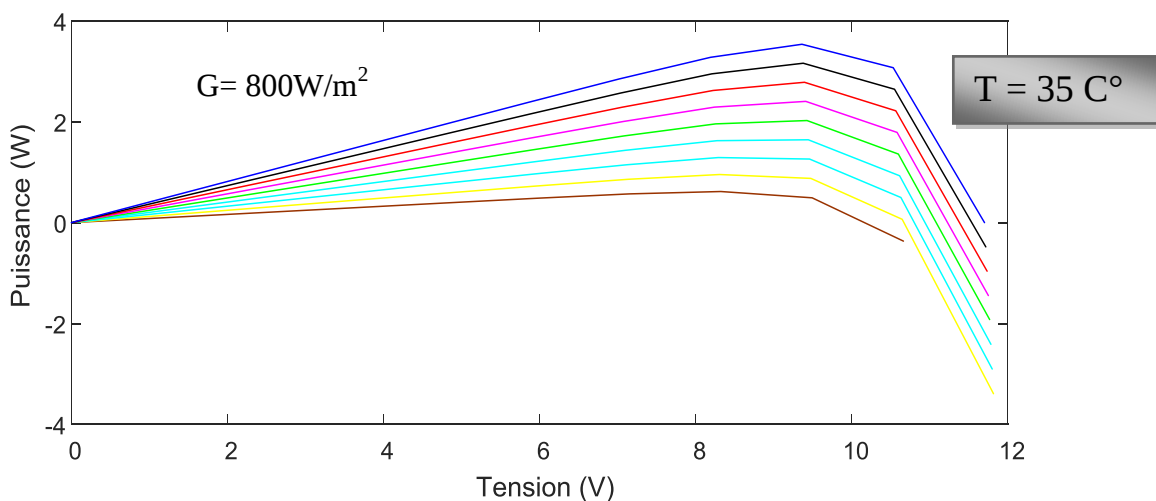


Figure I.22 : Caractéristique puissance-tension simulées pour le panneau photovoltaïque différentes valeurs de G et pour une température de cellule de 35°C

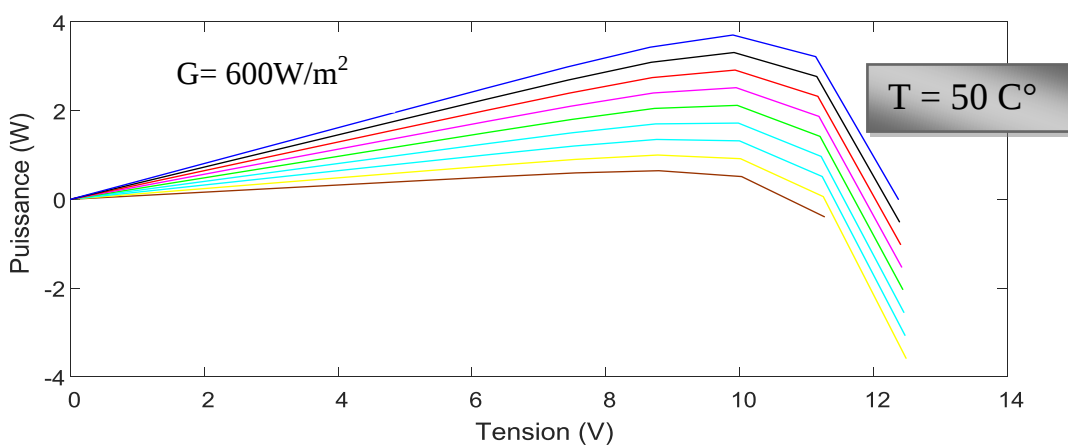


Figure I.23 : Caractéristique puissance-tension simulées pour le panneau photovoltaïque différentes valeurs de G et pour une température de cellule de 50°C

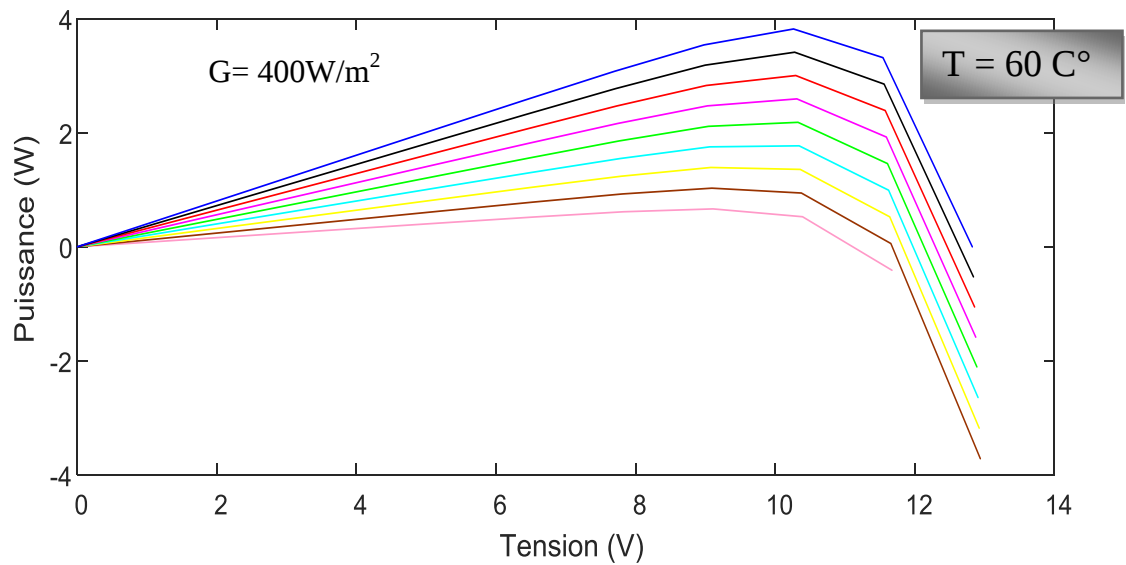


Figure I.24 : Caractéristique puissance-tension simulées pour le panneau photovoltaïque différentes valeurs de G et pour une température de cellule de 60°C

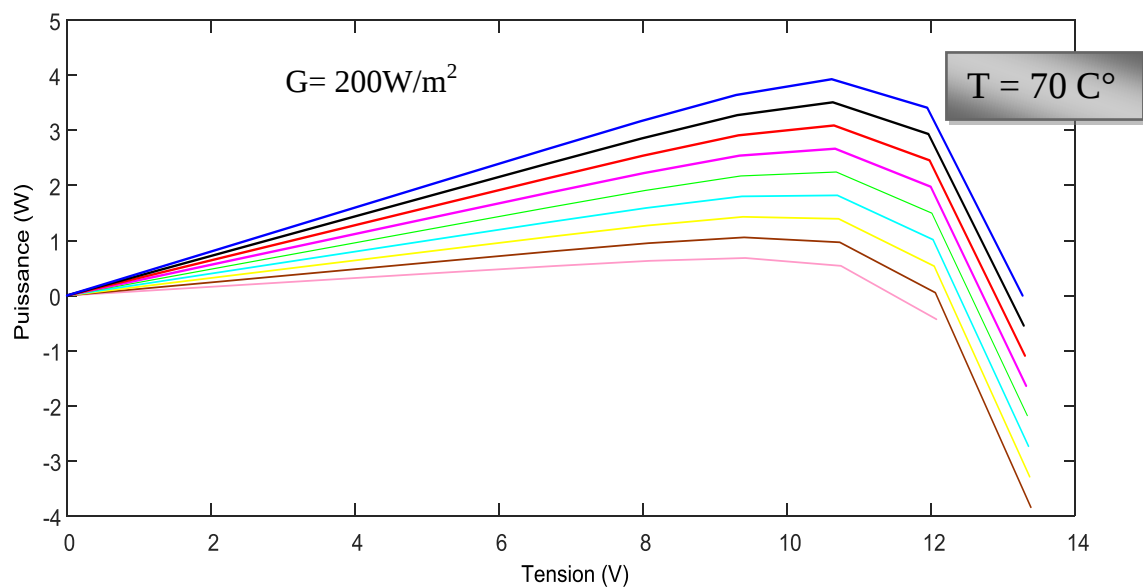


Figure I.25 : Caractéristique puissance-tension simulées pour le panneau photovoltaïque différentes valeurs de G et pour une température de cellule de 70°C

I.15. Avantages et inconvénients du solaire photovoltaïque:**I.15.1. Avantages :**

- Ressource gratuite et énorme potentiel réparti sur la terre
- Moyen décentralisé de production, autonomie
- Grande fiabilité et peu d'entretien (pas de pièces mobiles)
- Pas de pollution durant l'utilisation
- Grande souplesse de production, du Milliwatt au Megawatt [6].

I.15.2. Inconvénients:

- La fabrication des panneaux photovoltaïques relève de la haute technologie demandant énormément de recherche et développement et donc des investissements coûteux.
- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles.
- Nécessite un système d'appoint (batteries) pour les installations domestiques.
- Le coût d'investissement sur une installation photovoltaïque est cher [2].

I.16. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents concepts qui entrent en jeu. Le domaine de l'énergie photovoltaïque (panneaux solaires et cellule) où nous avons introduit des caractéristiques et des principes Opérant pour chaque élément, ainsi que les avantages et les inconvénients de cette énergie. Permettre l'analyse de ce système et l'étude de la façon de le stocker dans différents types de batteries pour les comparer, ce qui sera présenté dans le deuxième chapitre [4].

Chapitre II

Stockage énergie

II.1. Introduction:

Le système de stockage est un élément crucial de l'installation photovoltaïque du point de vue technique, mais aussi du point de vue économique; car il représente 40 à 50 % du coût de l'installation. Vue l'importance du stockage électrochimique de l'énergie solaire, une étude théorique des différents types de batteries est menée, en particulier la batterie au plomb qui est la moins coûteuse comparativement aux autres batteries [7].

II.2. Stockage d'énergie :

Le stockage de l'énergie consiste à mettre en réserve une quantité d'une source d'énergie en un lieu donné, sous une forme aisément utilisable, pour une utilisation ultérieure. Il est nécessaire pour valoriser avec efficacité les énergies alternatives, sûres et renouvelables mais intermittentes telles que l'énergie éolienne et l'énergie solaire. Stocker des calories ou de l'électricité permet de stabiliser les réseaux énergétiques, lisser les irrégularités de production/consommation dans le contexte de développement des énergies renouvelables, l'alimentation énergétique de sites insulaires ou isolés.

On s'intéresse ici principalement à l'opération consistant à créer un stock à partir d'énergie disponible, et non directement à la gestion des stocks (notamment des stocks d'énergie fossile), ni au déstockage.

II.3. Accumulateurs électro- chimiques:

II.3.1. Généralités

Il y a nécessité de stockage électrique chaque fois que la demande électrique est décalée dans le temps par rapport à l'apport solaire. Une demande énergétique est caractérisée par une courbe de charge; celle-ci peut être constante au cours de la journée et variable au cours de l'année. Elle peut être totalement aléatoire, mais avec des périodes de maxima et de minima statistiquement connues. Dans tous les cas on peut tout de même ramener la puissance moyenne consommée sur une période donnée en watts permanents équivalents.

Les durées de stockage peuvent être très variables, de quelques heures pour compenser des passages nuageux, de 12 h pour les utilisations nocturnes, de plusieurs jours pour un usage quotidien répétitif, de plusieurs mois pour le lissage inter saisonnier.

L'intérêt des accumulateurs électrochimiques est la disponibilité d'une tension quasi-constante qui fixe le point de fonctionnement sur une droite verticale qui peut être aussi proche que possible de la droite qui définit la charge optimale d'un générateur photovoltaïque.

II.3.1.1.Définitions et paramètres utiles

Les accumulateurs électrochimiques sont des générateurs “réversibles” c’est-à-dire pouvant stocker l’énergie électrique sous forme chimique puis la restituer à tout moment sur demande grâce à la réversibilité de la transformation. Contrairement aux photopiles où il n’y a qu’un transport d’électron ne donnant lieu à aucune « usure », dans les accumulateurs électrochimiques il y a transfert de matière de l’électrolyte vers les électrodes et par conséquent une « usure » incontournable qui limite leur durée de vie.

De nombreux types d’accumulateurs électrochimiques existent (Pb, CdNi, NiZn,) toutefois un des plus anciens et des plus utilisés dans l’automobile est l’accumulateur au Plomb-acide.

Dans le domaine industriel, trois applications principales donnent à l’accumulateur au Pb des caractères spécifiques:

- les batteries de démarrage
- les batteries de traction
- les batteries stationnaires de secours à grande réserve d’électrolyte. L’arrivée des applications photovoltaïques a imposé de nouveaux critères auxquels les fabricants de batteries ont dû s’adapter. L’accumulateur au Pb a donc subi des avancées constantes pour améliorer ses performances grâce au photovoltaïque.

Il est utile de redéfinir les principaux paramètres des accumulateurs afin d’en classer les différents types suivant leur conformité aux exigences des applications solaires.

II.3.1.1.1.Rendement d'utilisation

- **Rendement faradique:** le rendement en ampère- heures (ou faradique) est le rapport entre la quantité d’électricité débitée à la décharge Q_d et la quantité d’électricité fournie lors de la charge Q_c (Ah récupérés lors de la décharge/ Ah fournis pendant la charge).

$$\eta_q = \frac{Q_d}{Q_c}$$

Pb: > 90 % , Ni-Cd: < 80%

- **Rendement énergétique:** Sachant que la tension de charge est en général supérieure de 15 % (Pb) à 30 % (Ni-Cd) à la tension de décharge, le rendement énergétique utile est le produit du rendement faradique par le rendement de tension. Typiquement ,il vaut 56 % pour le Ni-Cd et 77 % pour le Pb.

II.3.1.1.2.Résistance interne:

La résistance interne d’un accumulateur est toujours très faible (de l’ordre de quelques centièmes d’ohm) et négligeable en général, dans les applications numériques. Cette faible

résistance interne présente d'ailleurs un inconvénient quand les deux bornes sont accidentellement, réunies par un conducteur lui-même peu résistant, la résistance totale du circuit reste très faible l'intensité du courant débité est considérable, peut provoquer un incendie et l'accumulateur, mis ainsi en court-circuit, est rapidement hors d'usage.

II.3.1.1.3. Capacité:

On appelle capacité la quantité d'électricité, évaluée habituellement en ampères-heures (Ah), qu'un accumulateur pleinement chargé peut faire circuler pendant une période de décharge donnée jusqu'à une tension d'arrêt et une température définies.

La capacité d'une batterie est toute relative et dépend considérablement des conditions d'utilisation. Pour les applications automobiles on définit la capacité pour une décharge en 5 ou 10 h, mais pour les applications solaires une capacité donnée pour une décharge en 50 ou 100 h convient mieux.

Par exemple, une batterie de capacité C_{100} égale à 140 Ah devra fournir à 25°C pendant 100 h au moins un courant de 1.4 A jusqu'au seuil d'arrêt de 1.75 V par élément.

Typiquement pour une capacité dite C_{100} de 140 Ah, la capacité à C_{10} sera de 100 Ah et la capacité à C sera de 60 Ah.

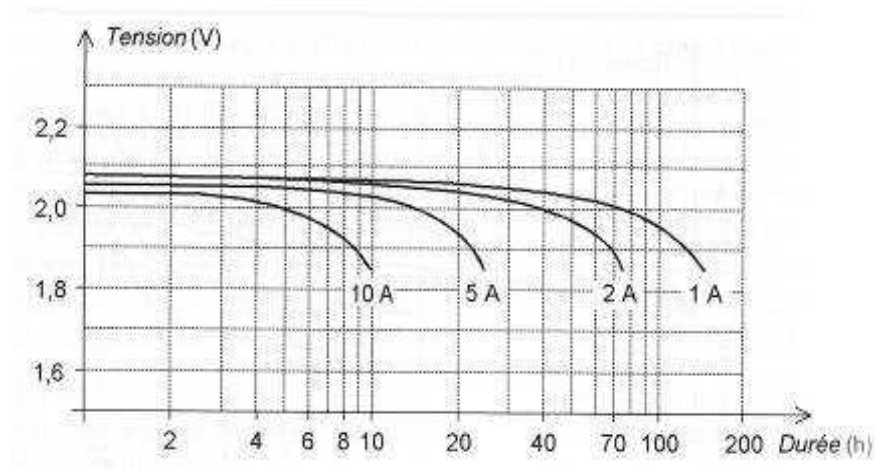


Figure .II.1 : Caractéristique de décharge type d'une batterie au Plomb de 100 Ah

La capacité nominale augmente avec la température de 0.7 % /°C dans la plage de température autorisée. Elle se détériore avec le vieillissement et avec le nombre de cycles.

II.3.1.1.4. Capacité massique:

On l'exprime en Wh / kg. De 28 Wh/kg pour le Ni-Cd, elle peut varier de 12 (Plomb pur) à 50 Wh/kg pour le Pb-Ca.

II.3.1.1.5. Auto- décharge :

Le taux d'autodécharge d'un accumulateur représente la perte moyenne relative de capacité par mois et pour une température donnée

$$\tau(\%) = \frac{Q_{AS} - Q_{PS}}{n \cdot Q_{AS}} \quad (\text{II.1})$$

Q_{AS} = capacité avant stockage, Q_{PS} = capacité après stockage, n = durée de stockage en mois

L'autodécharge est une caractéristique interne découlant de la technologie utilisée et est généralement donnée pour une température de 20°C. Les valeurs typiques sont de 3 à 15%/mois pour le Pb et jusqu'à 30 % /mois pour le Ni-Cd.

C'est une fonction linéaire du temps. Elle augmente avec l'âge et la température. Pour les batteries au Pb, elle est croissante avec la proportion d'antimoine inclus dans les armatures des plaques (afin d'en renforcer la tenue mécanique). Comme l'auto-décharge est un paramètre très important dans les applications solaires, on utilisera de préférence des batteries à faible taux d'antimoine. Un taux d'Antimoine compris entre 1.5 et 3% semble actuellement la valeur retenue.

II.3.1.1.6. Charge d'égalisation:

On appelle charge d'égalisation une charge excédentaire appliquée pendant 5 à 7 heures à une batterie déjà pleinement chargée. Cette surcharge se fait à courant constant à un régime proche de C_{20} . Les éléments présentent alors une meilleure homogénéité dans leur état de charge. Dans les batteries Pb-acide, la charge d'égalisation a pour effet de prévenir ou de résorber en partie la sulfatation dure résultante d'un état de décharge prolongé.

II.3.1.1.7. Profondeur de décharge:

Sans importance pour le Ni-Cd qui peut se décharger complètement, ce paramètre revêt une importance considérable pour les batteries au Pb puisqu'elles survivent rarement à une décharge totale. On limite en général la décharge à 80% de la capacité nominale. Pour les applications solaires, la profondeur de décharge ne dépasse guère 40 %, les accumulateurs étant souvent surdimensionnés afin d'augmenter leur durée de vie .

II.3.1.1.8. Tenue en cycles:

Dépendant beaucoup de la profondeur de décharge, ce paramètre varie typiquement de 400 cycles à 80 % de décharge à 2000 cycles à 40 % de décharge.

II.3.1.1.9. Durée de vie:

Les contraintes sont si nombreuses qui agissent sur ce paramètre que les constructeurs sont obligés de préciser le mode de fonctionnement pour pouvoir donner des valeurs approximatives: les durées de vie exprimées en années sont données pour un fonctionnement en floating à 25 °C. Elle varie de 2 à 7ans pour les batteries au Pb et de 10 à 25 ans pour les Ni-Cd. Elle diminue de moitié pour chaque élévation de 10 °C de la température d'utilisation.

II.3.1.1.10. Autonomie:

Dans le cas du Pb, il y a usure de l'électrolyte, d'autant plus forte que l'on surcharge les batteries. Même au repos, l'évaporation de l'eau est inévitable. Cependant, les constructeurs ont trouvé un moyen de la limiter en utilisant un électrolyte gélifié et des bouchons catalysant la réaction de recombinaison des gaz dans les accumulateurs étanches dits sans entretien. D'éventuelles surpressions dans la batterie sont éliminées par des soupapes de sécurité. [8]

II. 4. Accumulateur lithium – ion:

Une batterie lithium-ion, ou accumulateur lithium-ion, est un type d'accumulateur lithium. Ses principaux avantages sont une énergie massique élevée (deux à cinq fois plus que le nickel-hydrure métallique par exemple) ainsi que l'absence d'effet mémoire. Enfin, l'auto-décharge est relativement faible par rapport à d'autres accumulateurs. Cependant, le coût reste important et cantonne le lithium aux systèmes de petite taille

II.4.1. Principe de fonctionnement:**II.4.1.1. Aspect microscopique:**

La batterie lithium-ion est basée sur l'échange réversible de l'ion lithium entre une électrode positive, le plus souvent un oxyde de métal de transition lithié (dioxyde de cobalt ou manganèse) et une électrode négative en graphite (sphère MCMB)³. L'emploi d'un électrolyte aprotique (un sel LiPF₆ dissous dans un mélange de carbonate d'éthylène, de carbonate de propylène ou de tétra hydro furane) est obligatoire pour éviter de dégrader les électrodes très réactives.

La tension nominale d'un élément Li-ion est de 3,6 ou 3,7 V (selon la technologie).

Cette équivalence : 1 élément Li-ion = éléments Ni-MH est intéressante car elle permet parfois une substitution (du Li-ion par du Ni-MH uniquement, l'inverse pouvant s'avérer catastrophique).

Le Ni-MH est d'une utilisation plus sûre, notamment lors de la charge. Les problèmes de sécurité imposent d'intégrer un système électronique de protection, embarqué le plus souvent dans chaque élément au lithium, qui empêche une charge ou décharge trop profonde et permet l'équilibrage des tensions entre éléments dans les batteries constituées de plusieurs éléments en série; à défaut, le danger peut aller jusqu'à l'explosion de la batterie. Les courants de charge et de décharge admissibles sont aussi plus faibles qu'avec d'autres technologies. Par ailleurs, certains spécialistes estiment que leur durée de vie serait limitée à environ deux ou trois ans de fonctionnement normal (téléphone portable / tablette...).

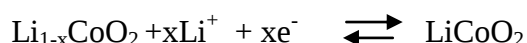
Cependant, certains accumulateurs Li-ion industriels de grande puissance (plusieurs centaines de watts par élément) durent jusqu'à 15 ans, grâce à une chimie améliorée et une gestion électronique optimisée. Ils sont utilisés en aéronautique, dans les véhicules hybrides et électriques, les systèmes de secours, les navires... EDF Énergies Nouvelles a mis en service un ensemble de batterie Li-Ion de 20 MWh à McHenry (Illinois) (en) destiné à réguler le réseau haute tension pour le compte de l'opérateur PJM Interconnection (en). Les sondes spatiales Galileo par exemple sont équipées de batteries Li-ion prévues pour douze ans. L'utilisation de la technique Li-ion à ces échelles de puissance n'en était qu'à ses débuts dans les années 2000.

II.4.1.2.Aspect microscopique électrochimie:

Les réactions électrochimiques permettant le fonctionnement d'un accumulateur forcent le déplacement d'ions lithium d'une électrode vers l'autre. En phase de décharge, l'ion Li^+ est libéré par une matrice de graphite pour laquelle il a peu d'affinité et se déplace vers un oxyde de cobalt avec lequel il a une grande affinité. Lors de la charge, l'ion Li^+ est relâché par l'oxyde de cobalt et va s'insérer dans la phase graphitique.

Lors de la décharge de l'accumulateur, cela se traduit par les équations chimiques suivantes :

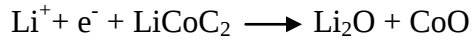
À l'électrode (+) :



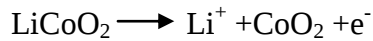
À l'électrode (-) :



Lors de la charge, les équations sont à considérer dans l'autre sens. Le processus de charge est limité par la sursaturation de l'oxyde de cobalt et la production d'oxyde de lithium Li_2O qui n'est plus susceptible de restituer l'ion Li^+ .



Une surcharge de 5,2 V conduit à la synthèse d'oxyde de cobalt(IV) CoO_2 .



Au sein de l'accumulateur lithium-ion, les ions Li^+ font donc la navette entre les deux électrodes à chaque cycle de charge/décharge mais la réversibilité n'est possible que pour $x < 0,5$.

La capacité énergétique d'un tel accumulateur est égale à la charge globale des ions transportés multipliée par la tension d'utilisation. Chaque gramme d'ions lithium déplacé d'une électrode vers l'autre transporte une charge égale à la constante de Faraday/6,941 soit 13 901 coulombs. Pour une tension de 3 V, cela correspond à 41,7 kJ par gramme de lithium, soit 11,6 kWh par kg. Cela représente un peu plus que la combustion d'un kg d'essence, mais bien évidemment il faut aussi considérer la masse des autres matériaux nécessaires au fonctionnement de l'accumulateur. [9]

II.4.2. Avantages et l' Inconvénients de la batterie au lithium:

▪ **Avantages:**

- Plus résistante aux décharges prolongées, profondes ou partielles
- Encombrement et poids réduit
- Souplesse d'utilisation en charge et décharge
- Fiabilité et efficacité
- Ils ne présentent aucun effet mémoire contrairement aux accumulateurs à base de nickel.
- Ils ont une faible auto- décharge (10 % par mois voire souvent moins de quelques % par an).
- Ils ne nécessitent pas de maintenance.
- Ils peuvent permettre une meilleure sécurité que les batteries purement lithium, mais ils nécessitent toujours un circuit de protection.

▪ **Inconvénient:**

- Chargeur spécial requis.
- Risque d'explosion si en court-circuit ou surcharge (production d'hydrogène !).

- Besoin de charger chaque élément d'un pack séparément, sinon risque de déséquilibre en tension.
- Besoin d'un régulateur 5 ou 6 V pour alimenter la réception, car un pack délivre $2 \times 3,6 \text{ V} = 7,2 \text{ V}$ [17].

II.4.3. Charge et décharge:

La charge se passe généralement en deux phases, une première phase à courant limité de l'ordre de $C/2$ à $1 C$ (C étant la capacité de l'accumulateur). Cette phase permet une charge rapide jusqu'à environ 80 %, puis une deuxième phase à tension constante et courant décroissant pour se rapprocher des 100 % de charge en environ deux heures de plus. La charge est terminée lorsque le courant de charge chute en dessous d'une valeur appelée courant de fin de charge.

La tension de fin de charge des accumulateurs Li-ion peut être de 4,1 à 4,2 V suivant la spécification du fabricant de l'accumulateur. La tolérance couramment admise est de $\pm 0,05 \text{ V}$ par élément, ils sont très sensibles à la surcharge et demandent une protection lorsqu'ils sont connectés en série. Les chargeurs doivent être de bonne qualité pour respecter cette tolérance. Il importe de toujours respecter la feuille de données fournie par le fabricant, qui fait état des conditions de charge de l'accumulateur (tolérance, courant de charge, courant de fin de charge, etc.). Toutefois, certains éléments destinés au grand public possèdent une électronique interne qui les protège des mauvaises manipulations (surcharge, décharge profonde). En effet, la décharge doit être limitée à une tension de 3 V par élément, une tension de décharge inférieure à 2,5 V peut conduire à une destruction de l'élément.

Les accumulateurs Li-ion ne doivent pas être confondus avec les piles au Lithium qui ne sont pas rechargeables, la confusion est entretenue par le terme anglais Battery, qui désigne une pile électrique alors qu'en français le terme batterie est utilisé, improprement, pour désigner généralement une « batterie d'accumulateurs électriques ».

II.5. Accumulateurs au Plomb acide:

Les accumulateurs au plomb sont la transposition dans le domaine industriel, du voltamètre $\text{Pb}/\text{H}_2\text{SO}_4/\text{Pb}$. Une batterie est constituée d'un ensemble d'éléments de 2 V connectés en série pour obtenir la tension d'utilisation désirée. La valeur usuelle de la tension d'une batterie de démarrage est de 12 V, soient six éléments intégrés dans un même bac, mais dans les systèmes de télécommunication la tension de batterie peut-être de 24 ou 48 V.

II.5.1. Description:

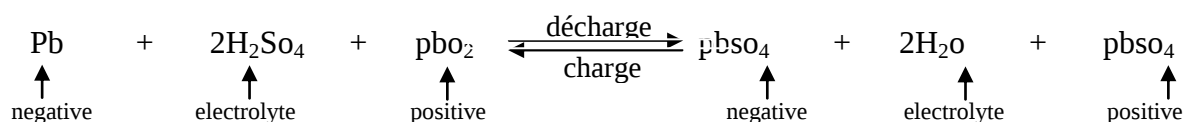
L'élément de 2V est constitué de plaques positives et négatives assemblées en alternance, le nombre de plaques de chaque polarité et leur surface définissant la capacité en courant de l'élément. Pour éviter les court-circuits entre plaques un séparateur micro-poreux isolant est disposé entre elles.

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 (PbO_2).

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.

La réaction réversible mise en jeu est donnée par :

**Organisation :**

L'énergie qu'on peut emmagasiner dans un accumulateur étant proportionnelle à la surface des électrodes, on a intérêt à augmenter leurs dimensions. Pour éviter un trop grand encombrement, on constitue deux faisceaux de plaques parallèles positives et négatives intercalées. L'ensemble des plaques est immergé dans l'électrolyte contenu dans un bac en matière isolante (verre ou matière plastique). Il existe au moins 4 catégories d'accumulateurs au Pb.

-Plomb pur de type Planté.

-Plomb-Calcium.

-Plomb à fort taux d'antimoine (batteries de démarrage).

-Plomb à faible taux d'antimoine (applications solaires).

II.5.2. Principe de fonctionnement:

L'accumulateur au plomb est le siège de réactions complexes. Le principe de transformation, très simplifié, est loin de rendre compte de toutes les observations courantes. En fait, pendant la décharge,

sulfurique décroît. A la cathode on observe une oxydation du Pb qui se transforme aussi en

Sulfate de Pb. Lors de la décharge, partie de l'acide sulfurique étant consommé, l'électrolyte voit ainsi sa densité le PbO_2 de l'anode est réduit et se transforme en Sulfate de Plomb ; la concentration de l'acide décroître. La sulfatation est donc le résultat normal de la décharge d'un accumulateur au Pb- acide. A ne pas confondre avec la sulfatation « dure » formée à partir de gros cristaux de sulfate de Pb difficilement solubles qui peut fortement diminuer la capacité.

Inversement pendant la charge, à l'électrode positive, le dioxyde de plomb se reforme ainsi que le Pb spongieux au niveau de la plaque négative et de l'acide sulfurique se reformant, l'électrolyte voit sa densité augmenter. Le moyen le plus sûr de vérifier l'état de charge est de mesurer la tension et la densité de l'électrolyte, ce qui permet de connaître la concentration en acide

II.5.2.1. Contraintes liées aux surcharges et aux décharges profondes:

Enfin de charge, si on prolonge le passage du courant, l'hydrogène et l'oxygène résultant de la décomposition de l'eau se dégagent à l'état gazeux sur les électrodes (Electrolyse).

Si la décharge se produit trop longtemps, ou trop profondément, ou si on ne surveille pas la concentration d'acide sulfurique, celui-ci peut attaquer les plaques en donnant du sulfate de plomb PbSO_4 , qui n'est plus détruit par la suite. L'accumulateur se sulfate, il finit par devenir inutilisable.

N.B. : On voit qu'il est important de surveiller l'état de charge ou décharge d'une batterie au plomb pour la conserver en bon état car un fonctionnement prolongé dans un sens ou dans l'autre aboutirait à la destruction définitive de l'accumulateur. Cet inconvénient peut être surmonté si le système est équipé d'un régulateur de charge-décharge avec correction en température des seuils de tension.

II.5.3.Caractéristiques:

II.5.3.1.Tension:

La tension aux bornes d'un élément d'accumulateur au plomb est voisine de 2V. Sa valeur varie entre 1,7 V et 2,4 V suivant l'état de charge en conditions normales de fonctionnement.

▪ Charge:

Pendant la charge, l'accumulateur est un récepteur. Si on trace graphiquement la différence de potentiel aux bornes en fonction du temps, on constate (cf Figure II.2) qu'après un court régime transitoire elle s'établit aux environs de 2,2 V. En fin de charge (point M), on note un accroissement rapide de la tension. Les plaques, complètement polarisées, ne retiennent plus

l'oxygène et l'hydrogène dégagés. La fin de charge est atteinte à 2,6 V ou 2,7 V en charge cyclique. En charge flottante (régulation de charge) on se limite entre 2,25 V et 2,35 V par élément.

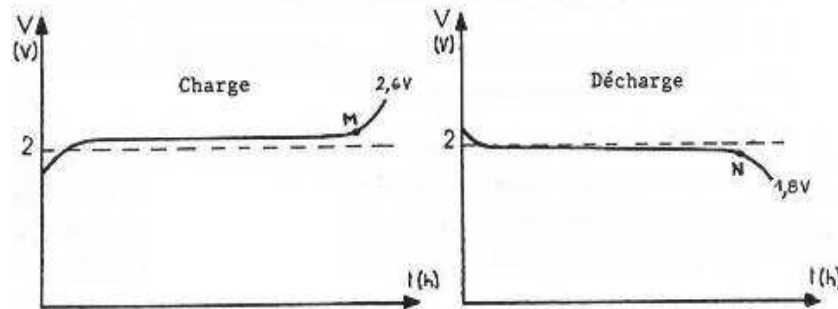


Figure .II.2: Tension de charge des accumulateurs

▪ Décharge:

Pendant la décharge, la force électromotrice varie, en fonction du temps comme l'indique la figure. Pendant une assez longue durée d'utilisation, elle reste remarquablement constante à la valeur de 2 V environ. A partir du point N, elle diminue brusquement (1,8 V), il faut alors recharger l'accumulateur, sous peine de voir apparaître la sulfatation des plaques. En pratique, on ne descend pas en général au-dessous de 20% ou davantage de la capacité batterie. Sinon, la sulfatation entraîne une perte de capacité et une augmentation de la résistance interne d'où une baisse de tension.

II.5.3.2.Rendement:

Le rendement faradique du Pb est de l'ordre de 90%. Le rendement énergétique est de l'ordre de 70 à 80%

II.5.3.3.Autodécharge:

Elle est de l'ordre de 10 % par mois à $T = 20^{\circ}\text{C}$, pour les plaques au plomb - anti monieux (on a vu que cet alliage a pour but d'augmenter la tenue mécanique). Elle est de l'ordre de quelques % par mois pour le plomb doux (à faible teneur d'antimoine) ou le plomb - calcium mais les éléments sont plus fragiles. L'autodécharge varie très rapidement avec la température. Elle double de valeur tous les 10°C .

II.5.3.4.Durée de vie:

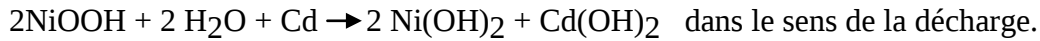
En limitant la profondeur de décharge journalière ($< 15\% \text{ Cn}$) et la profondeur de décharge saisonnière ($< 60\% \text{ Cn}$), on estime la durée de vie des accumulateurs au Pb à 6 ou 7 ans, ceux-ci étant protégés contre la surcharge. [10]

II.6. Les accumulateurs Cadmium – Nickel:

II.6.1. Description:

Les accumulateurs Cadmium-Nickel sont réalisés à partir de 2 électrodes (hydroxyde de Nickel et Cadmium) immergés dans une solution de potasse.

La réaction réversible globale est la suivante:



L'électrode positive est l'hydroxyde de Nickel, et le Cadmium l'électrode négative.

L'électrolyte est à base de potasse, d'où le nom d'accumulateur alcalin. La tension varie de 1.15 à 1.45 V par élément avec une valeur nominale à 1.2 V.

Bien que moins performants que les accumulateurs au Plomb, les accumulateurs au Cd-Ni présentent les avantages suivants:

- très bonne résistance mécanique (applications embarquées)
- ne craignent pas le gel et supportent les températures élevées.
- supportent les décharges totales
- pas d'émanation toxique

II.6.2. Caractéristiques:

La tension nominale est de 1,2 V mais elle varie entre 1,15 V et 1,45 V par élément suivant l'état de charge.

- Les éléments sont par construction, plus robuste et moins lourds que ceux au plomb
- Ils acceptent plus facilement la surcharge ou décharge- profonde.
- Pour les petites capacités, ils se présentent sous forme cylindrique (comme les piles) en version étanche
- Ils peuvent fonctionner sur une grande plage de température
- Ils nécessitent un entretien réduit ce qui leur confère, en pratique une grande durée de vie.

En revanche

- Le rendement de l'accumulateur est faible (rendement faradique 70%)
- L'autodécharge est plus élevée que celle des accumulateurs au plomb (> 15%)
- Les écarts de tension entre charge et décharge sont plus importants
- Leur coût est élevé.[11]

II.7. Lithium Polymère (Li-Po):

II.7.1. Histoire:

Il aura fallu attendre 1999 avant de voir arriver les batteries Lithium Polymère appelé aussi

Li-Po. Elles sont utilisées généralement comme les batteries Lithium-ION et leurs fonctionnements sont similaires. Cette technologie est également utilisée par l'électronique portable comme les ordinateurs portables, les tablettes, les mobiles, les drones, les karts et même les vélos électriques. Certains constructeurs automobiles tentent l'expérience, car la technologie est plus stable.

II.7.2. Fonctionnement:

Le fonctionnement est semblable au Lithium-ION, la différence réside dans le fait qu'au lieu d'avoir une électrolyte liquide nous avons un **électrolyte gélifié**, ce qui lui donne des avantages sur sa proche cousine.

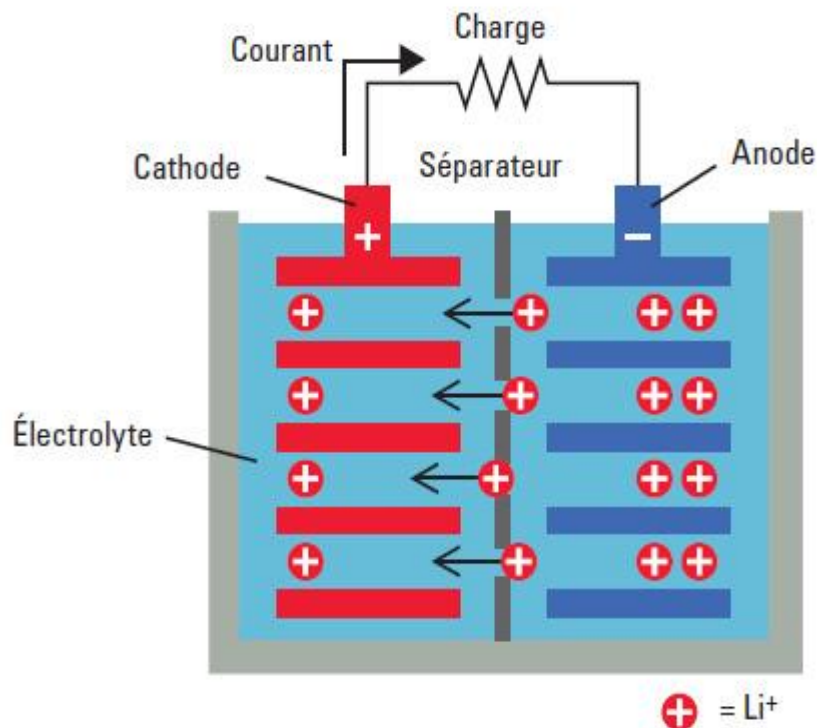


Figure .II.3: principe de fonctionnement

II.7.3. Avantages et inconvénients des batteries Li-Po :

▪ Avantages :

- Rapport énergie/masse
- Forte intensité de décharge
- Faible autodécharge
- Pas d'effet mémoire.

▪ Inconvénients :

- Durée de vie limitée à quelques dizaines de cycles (50 à 100). Là encore les LiPo de 3ème génération ont une durée de vie beaucoup plus longue.
- S'use même si non utilisée
- Nécessite un chargeur spécifique avec équilibrage. [11]

II.8. Autres couples électro-chimiques :**II.8.1. Nickel-Zinc:**

Dans le contexte actuel de souci environnemental, le remplacement du Cadmium par le Zinc serait le bienvenu. La tension de ce couple varie de 1.6 à 1.8 V. La durée de vie reste le problème majeur à résoudre.

II.8.2. Nickel-Fer:

Ils peuvent subir un très grand nombre de cycles. Pour cette raison Peugeot les a utilisés dans les préséries de 205 électrique. Ils ont un très fort taux d'auto-décharge et un rendement faible. La tension varie entre 1.2 et 1.4 V.

II.8.3. Nickel-NaCl:

Simple, de très forte capacité pouvant subir un très grand nombre de cycles et extrêmement robustes, ces accus fonctionnent malheureusement à 200°C et nécessitent qu'une partie de l'énergie soit utilisée pour les maintenir à cette température. Leur développement est provisoirement arrêté mais pourrait bien reprendre. [12]

II.9. Batteries utilisées dans l'expérience:

Dans notre expérience, nous avons utilisé ce type de batterie Li-Po. Le tableau suivant montre quelques détails et caractéristiques de la batterie

Tableau :II.1. Détails sur la batterie

Batterie	caractéristique	Figure
Li -Po	Battery capacity: 3.6V 5000mAh Interface: Micro USB(input), USB(output) Input: DC 5V, 1.0A Output: DC 5V, 2.1A Temps de charge: environ 3,5 heures avec chargeur Size: 136 x 56 x 13.5mm	

II.9.1. Charge batterie Li-Po:

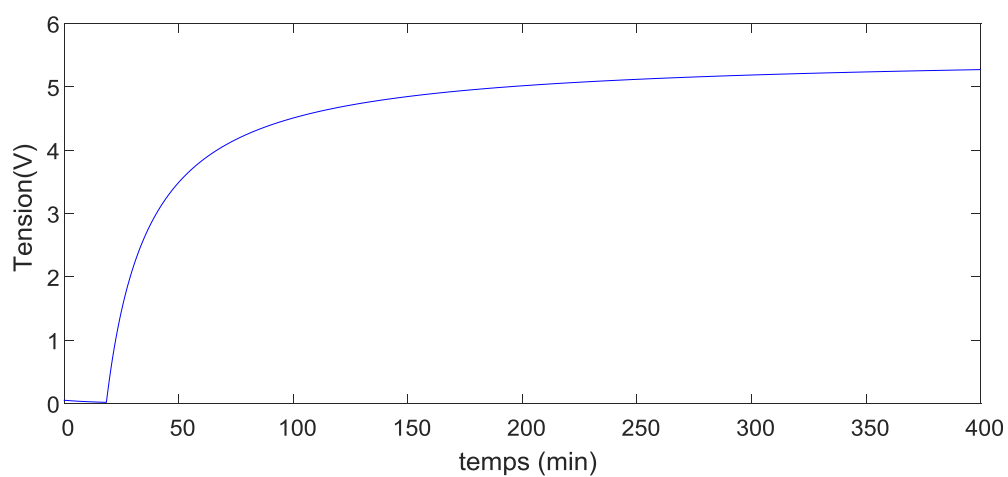


Figure .I.4: Charge simulée d'un Li-PO

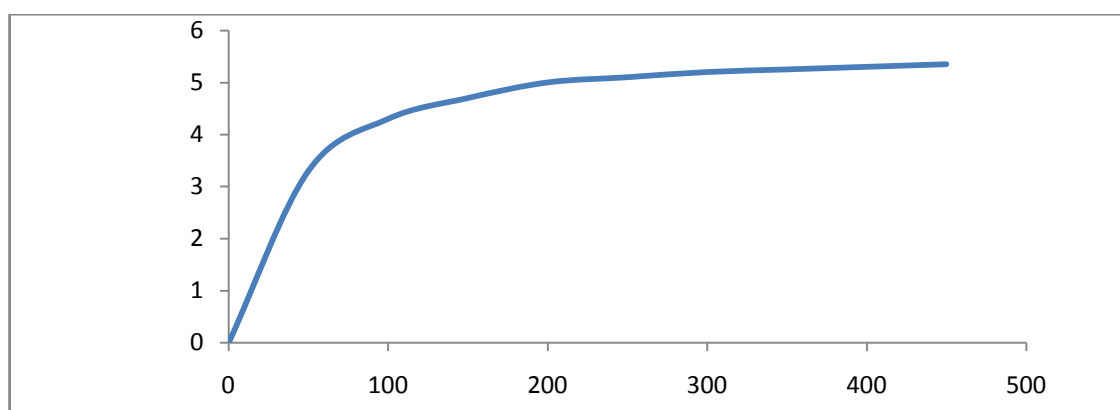


Figure .I.5: Charge expérimentale batterie Li-Po

II.10.Conclusion:

Dans le système photoélectrique, la caractérisation de l'équipement de stockage représente des difficultés considérables. La grande variété de batteries et le nombre de paramètres interférents permettent non seulement de donner une représentation expérimentale du comportement dynamique des batteries. Les éléments de lithium ont Caractéristiques de la puissance et meilleure puissance. Ils ont une bonne vie et une bonne fiabilité. En raison de leur coût relativement faible et de leur grande disponibilité, ils sont les plus courants et les plus utilisés. Le but de cette étude est de connaître précisément les indicateurs clés et les indicateurs qui affectent :Fonctionnement sur batterie, comme réserve de marche pour les installations solaires [13]

Chapitre III

Véhicule Solaire

III.1. Introduction :

d'énergie est l'énergie de combustibles fossiles .Nous utilisons l'énergie de ces sources pour produire de l'électricité, faire fonctionner des automobiles, etc. Mais les principaux inconvénients de ces combustibles fossiles sont qu'ils ne sont pas respectueux de l'environnement et qu'ils sont épuisables. Pour faire face à ces problèmes de combustibles fossiles, nous devons regarder les sources non conventionnelles de l'énergie. En ce qui concerne cette idée, nous avons conçu un véhicule électrique qui fonctionne à l'énergie solaire. Le véhicule conçu est un quatre roues motrices et peut être utilisé pour la navette et de courtes distances. Comme ces véhicules constituent l'avenir de l'industrie automobile, nous devons nous concentrer sur l'amélioration de leur conception et leur rentabilité. Ce véhicule est une initiative dans cette direction.[15]

III.2. Notions de voitures électrique et solaire :

III.2.1. Voiture électrique :

Une voiture électrique fonctionne grâce à un moteur électrique qui est alimenté par un accumulateur d'énergie, autrement dit une batterie. Il est alors nécessaire de charger la batterie car c'est elle qui stockera l'énergie emmagasinée pendant que l'automobile roule. Sachez également que lorsqu'on ralentira, cessera l'occasion, pour le système, de récupérer de l'énergie supplémentaire. D'ailleurs, il faut également savoir que l'accumulateur d'énergie permet de parcourir un certain nombre de kilomètres selon l'autonomie de l'automobile. Cependant, l'opération de rechargement de la batterie peut prendre plus ou moins de temps selon la puissance de la prise de la borne. Ainsi, ce temps de chargement peut être rapide (environ 30 minutes) ou prendre quelques heures (jusqu'à 8 heures) suivant le modèle de la véhicule.

III.2.2. Voiture solaire :

Le soleil est la source de lumière et de chaleur qui permet aux différents systèmes organiques de sur vivre ,grâce à l'énergie abondante qu'il leur procure. Mais alors, pourquoi ne pas utiliser cette énergie colossale pour palier notre futur menacé par le manque du pétrole ? C'est ainsi, que naît le principe de la voiture solaire. En effet, une voiture solaire n'est autre qu'un véhicule électrique dotée de moyens de capter la lumière émise par le soleil puis de la transformer en énergie électrique pour le chargement des batteries.

III.3. Constituants de la voiture solaire-électrique :

III. 3.1. Moteur :

III.3.1.1. Principe de fonctionnement:

Un moteur électrique est composé principalement d'un stator (fixe), et d'un rotor (qui tourne). Le stator, qui entoure le rotor, génère un champ magnétique. Ce champ peut être généré par induction, ou par des aimants permanents. Le rotor est constitué de bobines, dont le fil est recouvert d'une couche isolante, et de connecteurs. Il est solidaire de l'axe central du moteur. La Figure III-1 montre une vue en coupe d'un moteur électrique simple.

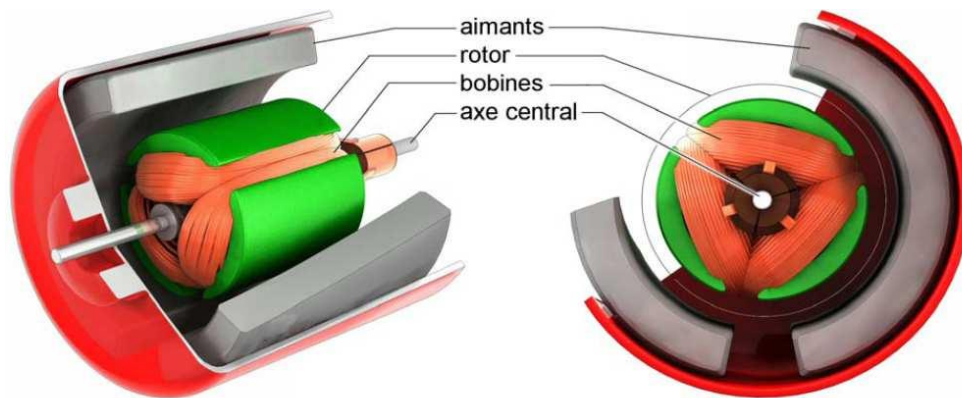


Figure .III.1 : Schéma du moteur électrique

D'après Laplace, un conducteur placé dans un champ magnétique $\vec{B}$ et parcouru par un courant I , est soumis à une force $\vec{F}$, perpendiculaire au plan formé par I et $\vec{B}$. La direction et le sens de ces trois vecteurs sont déterminés par la règle des trois doigts de la main droite (Figure III-2). Le pouce indique le sens du courant, l'index indique le sens du champ magnétique, et le majeur indique le sens de la force.

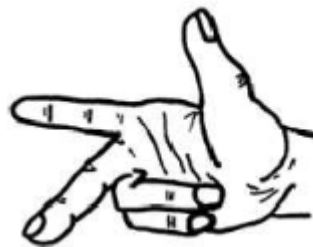


Figure .III.2 : Règle des trois doigts de la main droite.

C'est ainsi que le courant et le champ magnétique présents dans un moteur électrique permettent de faire tourner le rotor, et donc l'axe du moteur. La Figure III-3 représente de manière simplifiée un moteur électrique.

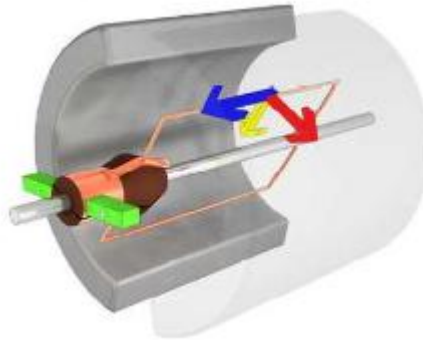


Figure .III.3 : Moteur électrique simplifié.

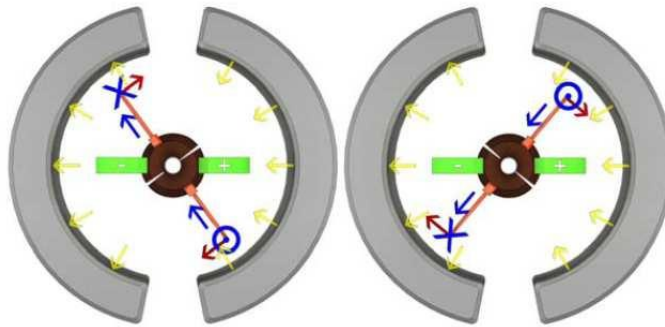


Figure .III.4 : Schéma de moteur électrique avec la force de Laplace.

Comme on peut le voir, il y a deux pôles en vert. Ces pôles transmettent le courant connecteur central. Un fil relie les 2 pôles en formant un rectangle (ce fil représente une bobine de 1 spire). Sur ce fil s'exerce la force de Laplace, comme illustré par des flèches. La force de Laplace ne s'exerce bien sûr pas seulement en ce point, mais sur toute la longueur du fil, tant qu'il est perpendiculaire au champ magnétique. La Figure III-4 illustre le schéma d'un moteur à deux phases, pour plus d'efficacité. Cela signifie qu'à chaque moitié de tour du rotor, le courant dans la bobine s'inverse, et que la force est toujours exercée dans le sens de rotation. Le moteur délivre ainsi une puissance élevée et continue, dès une fréquence de rotation basse.

III.3.1.2. Configurations :

La motorisation électrique peut être implantée sur l'essieu avant, l'essieu arrière ou les deux (Figures III-5, III-6 et III-7). Elle est alors composée d'un moteur équipé d'un réducteur,

généralement épicycloïdal, accouplé à un différentiel. L'ensemble est relié aux roues par l'intermédiaire de transmissions.



Figure .III.5 : Implantation des éléments d'une voiture électrique à traction avant.

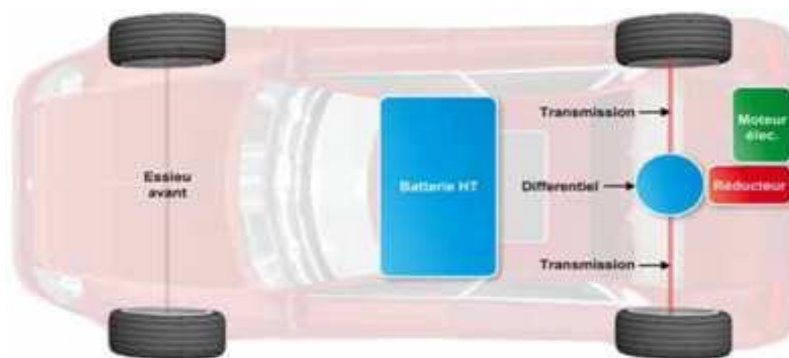


Figure .III.6 : Implantation des éléments d'une voiture électrique à propulsion.

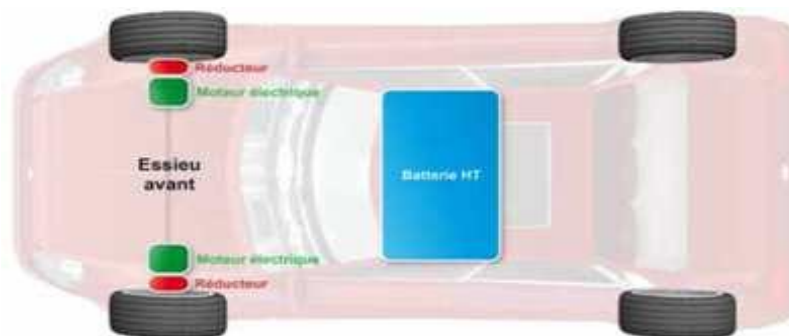


Figure .III.7 : Implantation des éléments d'une voiture électrique, moteurs dans les moyeux.

Les moteurs peuvent être incorporés aux moyeux sur l'essieu avant, l'essieu arrière ou les deux (Figure III-8). Cette solution présente des inconvénients, car d'une part, on augmente les masses non suspendues et d'autre part, il est nécessaire d'utiliser un convertisseur onduleur par moteur.

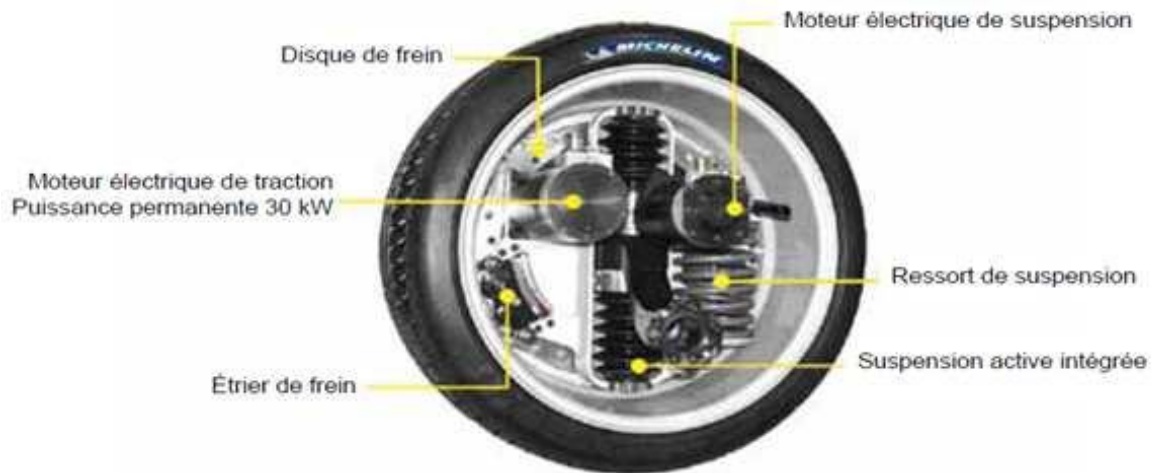


Figure .III.8 : Exemple de moteur incorporé au moyeu : « Active Wheel » de Michelin Heulliez.

III.3.1.3. Rendement :

Le moteur électrique offre, par ailleurs, un rendement nettement meilleur que les versions thermiques. Clairement, cela veut dire qu'il utilise mieux l'énergie disponible. Même si le chiffre dépend largement des conditions d'utilisation, on s'accorde à annoncer un rendement de 80 % environ pour une voiture électrique contre 20-30 % avec une motorisation thermique. C'est-à-dire qu'une voiture électrique met à profit 80 % de l'énergie qu'elle utilise.

III.3.2. Batterie :

Le stockage de l'énergie électrique à bord d'un véhicule reste le problème majeur actuellement. Ce stockage est caractérisé par deux paramètres principaux :

- La puissance utilisable (en kW) : Il s'agit du produit de la tension batterie par l'intensité maximale qu'elle peut débiter (c.-à-d. $P=U \times I$). La puissance utilisable doit être au moins égale à la puissance de pointe du moteur électrique afin de permettre son alimentation sur toute sa plage de fonctionnement.
- L'énergie stockée(en kWh) : Cette énergie peut être comparable au volume d'un réservoir de carburant d'un véhicule thermique. C'est l'énergie stockée qui va déterminer l'autonomie d'un véhicule électrique.

III.3.2.1. Types:

Il existe plusieurs types de batteries utilisées dans le secteur automobile comme la batterie plomb (Pb), la batterie nickel cadmium (Ni-Cd), la batterie lithium Polimer (Li-Po) .

III.3.2.2. Durée de vie :

Le cyclage (nombre de cycles complets de charge et décharge de la batterie) indique la durée de vie de la batterie solaire. Alors il est recommandé de bien vérifier que le cyclage est clairement indiqué par le fabricant. Les batteries solaires de qualité ont une durée de vie de plus de 500 cycles, soit de 7 ans jusqu'à 15 ans.

III.3.2.3. Système de charge :

On distingue plusieurs méthodes pour assurer la recharge des batteries de traction :

- Charge lente: La charge lente consiste à recharger une batterie à partir d'une prise 240V16 A.

Exemple : Déterminons le temps pour une charge complète d'une Peugeot Lion dont la batterie a une capacité énergétique de 16 kWh.

- ✓ Puissance de charge : $240\text{ V} \times 16\text{ A} = 3840\text{ W}$ soit 3,84 kW
- ✓ Temps de charge : $16\text{ kWh} / 3,84\text{ kW} = 4,2\text{ h}$

Ce temps est théorique et doit être majoré de 10 % pour tenir compte des pertes, soit environ 5 heures pour notre exemple.

- Charge rapide : Les batteries modernes lithium peuvent être chargées à 80 % en l'espace de 30 minutes.
- Échange pack : Le remplacement du pack batterie déchargé par un autre prêt à l'emploi.
- Charge par induction : Ce principe de charge supprime toute connexion entre le véhicule et le réseau électrique. Une plaque à induction est installée sur une place de parking réservée au véhicule électrique. Lorsqu'un véhicule y stationne, le capteur d'énergie placé sous le véhicule capte l'induction et la transforme en courant afin de recharger la batterie (Figure III-9).

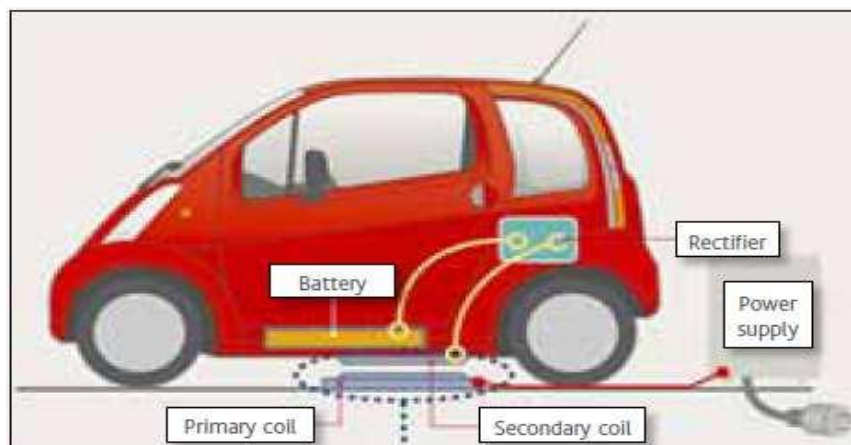


Figure .III.9 : Exemple de charge par induction.

III.3.2.4. Isolation galvanique :

La batterie fournit à la chaîne de traction une tension et une intensité importantes, potentiellement dangereuses et nécessitant divers systèmes de sécurité. L'isolation galvanique constitue l'un de ces systèmes. Son principe consiste à isoler complètement le circuit Haute Tension de la carrosserie du véhicule et à surveiller en permanence cet isolement. Cette surveillance est généralement effectuée par le BMS.

Un défaut d'isolement peut entraîner la déconnection automatique de la batterie Haute Tension par le BMS, ce qui élimine tout risque de court-circuit HT par la masse du véhicule.

III.3.2.5. Caractéristiques recherchées :

Le problème principal est le stockage difficile de l'énergie. On espère que, dans le futur, les batteries auront une densité d'énergie et une puissance plus hautes, autant dans le processus de chargement que dans celui de déchargement. Les caractéristiques principales de ces batteries devraient être :

- un coût bas ;
- compatible avec l'environnement ;
- une quantité minimale du processus d'autodécharge ;
- une longue durée de vie.

III.3.3. Panneaux photovoltaïque :

Pour alimenter les voitures électriques en électricité on a également pensé à installer des panneaux solaires sur les parties planes de la voiture. Sachant que la voiture est exposée au soleil lorsqu'elle roule, alors on peut utiliser l'énergie solaire pour recharger les batteries et ainsi permettre au véhicule une certaine autonomie. Découvert en 1839 par Alexandre Edmond Becquerel, l'effet photovoltaïque permet la transformation de l'énergie lumineuse en électricité. Ce principe repose sur la technologie des semi-conducteurs.

C'est Albert Einstein qui, le premier, a pu expliquer le principe photovoltaïque, avec à la clef, le prix Nobel de physique en 1923. En 1955, des chercheurs américains (Chapin, Fuller, Pearson et Prince) travaillant pour les laboratoires Bell Telephone (devenus aujourd'hui Alcatel-Lucent Bell Labs) développent une cellule photovoltaïque à haut rendement de 6%. Les premières applications ont lieu dès les années 60 avec l'équipement de satellites spatiaux. Les américains lancent en 1959 le satellite Vanguard qui est alimenté par des piles photovoltaïques ayant un rendement de 9%. Puis à partir de 1970, les premières utilisations

terrestres ont concerné l'électrification des sites isolés. Les panneaux solaires installés dans les voitures solaires électriques sont les mêmes panneaux utilisés pour la production de l'électricité dans les sites photovoltaïques sauf que ces panneaux doivent avoir une forme qui peuvent s'adapter à la surface plane des voitures.

III.3.4. Autres accessoires :

III.3.4.1. Régulateurs :

Vous pouvez connecter une batterie solaire directement à un panneau solaire, mais vous pouvez endommager la batterie si son niveau de charge dépasse 90%. Pour cette raison, il est fortement recommandé d'installer un régulateur solaire entre les panneaux solaires et les batteries solaires.

Le rôle du régulateur dans l'installation de l'énergie solaire est très important car le niveau de charge des batteries solaires ne doit pas être trop bas (pas moins de 40%) et pas trop élevé (pas plus de 95%). Les surcharges excessives ou excessives détruisent les batteries et limitent leur durée de vie ,dans cette expérience, nous avons utilisé un régulateur de tension pour maintenir la valeur du stress.

III.3.4.2. Chargeur électrique :

Le chargeur, quant à lui, accoutume le courant apporté par la prise de branchement à ce que la batterie électrique peut recevoir.

III.3.4.3. Boîtier d'interconnexion :

Le boîtier d'interconnexion transmet l'énergie à la bonne intensité soit : à la batterie, aux composants électroniques ou au moteur de la voiture, en fonction de ce qui leur est nécessaire et de la phase de roulage du véhicule (charge, accélération, décélération, etc.).

III.3.4.4. Hacheurs :

Le convertisseur électronique, encore appelé hacheur, permet de faire varier la tension aux bornes du moteur et par conséquent la vitesse de rotation. Il agit par découpage de la tension, d'où son nom de « hacheur ».

Note : Les convertisseurs sont gérés par un microprocesseur qui limite ou stoppe le fonctionnement en cas de température et d'intensité excessives.

III.3.4.5. Convertisseurs :

Le circuit de bord d'un véhicule électrique est identique à celui d'un véhicule thermique et doit être alimenté par une batterie de 12 V.

Les véhicules électriques ne peuvent plus être équipés d'un alternateur pour charger la batterie de bord. Cette fonction est alors confiée à un convertisseur DC/DC, qui puise l'énergie électrique dans la batterie haute tension et la transforme pour charger la batterie 12 V, tout en assurant l'isolement électrique entre les deux batteries (isolation galvanique).[16]

III.4..Basic diagramme fonctionnel :

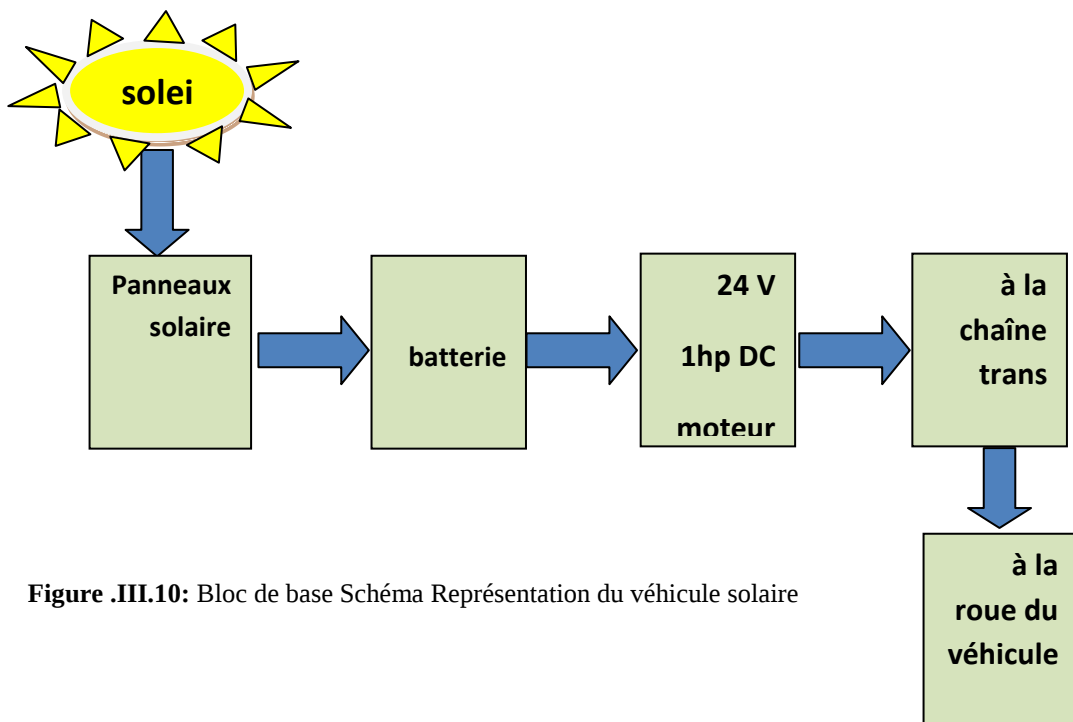


Figure .III.10: Bloc de base Schéma Représentation du véhicule solaire

Le diagramme ci-dessus donne un aperçu du fonctionnement du véhicule solaire. Le soleil est la principale source d'énergie pour le véhicule. L'énergie du soleil est captée par les panneaux solaires et est convertie en énergie électrique. L'énergie électrique ainsi formée est envoyée aux batteries qui sont chargées et utilisées pour alimenter des moteurs à courant continu de 24 V à couple élevé. L'arbre du moteur est relié à la roue arrière du véhicule par l'intermédiaire d'un pignon de chaîne. Les batteries sont initialement complètement chargées. Et par la suite, elles sont chargées par des panneaux. Cela aide à compléter le cycle de charge-décharge des batteries, ce qui est très important pour le bon fonctionnement des batteries

III.5. Les composants utilisés dans notre expérience:

Divers types de composants ont été utilisés pour fabriquer le véhicule à énergie solaire. Une liste de ces composants utilisés avec leur gamme et les quantités spécifiques requises pour la fabrication du véhicule solaire sont :

❖ panneau solaire :

Le panneau solaire utilisé dans la voiture solaire est 35 WP. Le point principal à considérer lors de la fabrication d'une voiture solaire est l'installation du panneau solaire. Le panneau doit être installé d'une manière qui reçoit le maximum de lumière du soleil pour donner un maximum d'efficacité. Solaire utilisé dans la voiture multi-cristal. La raison derrière l'utilisation de la cellule multi-cristalline est qu'elle est plus efficace que la cellule monocristalline et le taux de conversion pour une énergie plus rapide dans le premier. 36 cellules sont utilisées dans le module PV de ce véhicule. Le cadre supérieur de ce module solaire est recouvert de verre épais pour éviter la fissuration des panneaux solaires.

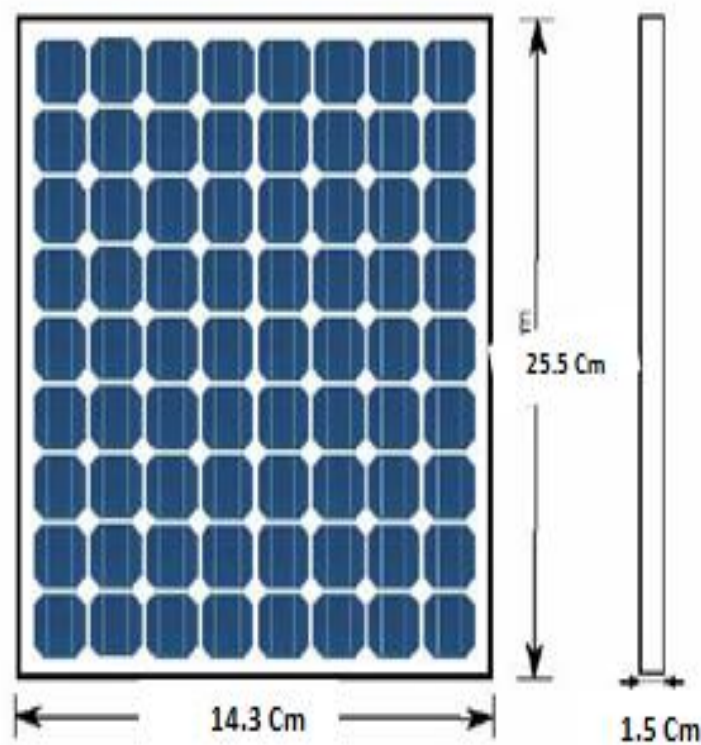


Figure .III.11: Représentation di grammaticue du panneau et des connexions du panneau

Le reste des matériaux utilisés dans le tableau ci-dessous

Tableau .III.1: Les composants utilisés dans notre expérience

Composants	utilisés	Figure
Batterie Li-Po	Battery capacity: 3.6V 5000mAh , Interface: Micro USB(input), USB(output) Input: DC 5V, 1.0A ,Ouput: DC 5V, Temps de charge: environ 3,5 heures av 5V / 2A chargeur Size: 136 x 56 x 13.5mm	
Batterie Ni-Cd	9V , 120mAh	
Batterie Pb	1.5V	
Regulateur De tension	Regulateur de tension 5V pour protéger la batterie contre les dommages	
Moteurs		

III.6. Travail du véhicule:

Le module solaire monté sur le toit de la voiture est utilisé pour charger les batteries via le contrôleur de charge. Un module solaire de 35 WP est utilisé avec une sortie allant de 9V à 10V . Les batteries sont initialement complètement chargées, puis elles sont connectées au module solaire pour la charge. Cela aide à garder la batterie chargée toujours. Ceci est également fait que l'efficacité du module solaire est seulement de 15%. Ainsi, sous Cette condition le la batterie est complètement rechargée dans les 8 heures-8,5 heures. Ainsi, pour garder la pleine onde sinusoïdale de la charge, ce tour de temps est effectué. Les radiations solaires maximales sont obtenues entre le matin 9h et le soir 16h30. Par conséquent, le panneau est monté de manière à ce que la sortie maximale puisse être obtenue. Le moteur prend un courant de la roue dans le démarrage élevé pour propulser sens avant .au début la roue dans le sens avant. Au début du La charge sur le moteur est de près de 1.5 kg, y compris le poids de la personne qui le conduit. Le moteur après le démarrage acquiert la vitesse maximale de 6 km / h à 7 km / h. Les batteries sont toujours chargées depuis le panneau solaire et donc il fournit la course continue pour le véhicule. Lorsque la vitesse varie, le courant de charge varie également. Donc la vitesse la variation doit être faible pour maintenir la batterie en vie pendant une durée maximale. Pour arrêter le moteur, l'interrupteur de contrôle de la vitesse doit être réglé sur la vitesse minimale, mais ceci devrait être évité car cela pourrait endommager le moteur et également produire une force électromotrice inutile. La batterie de secours moyenne est d'environ quatre heures. Les batteries sont continuellement chargées par le panneau solaire chargent les batteries. Par conséquent, le cycle de charge et de décharge des batteries sera terminé.

III.7. Résultats expérimentaux :

Afin d'obtenir la meilleure qualité de la voiture solaire nous avons comparé différents types de batteries (Li-Po ,Ni-Cd ,Pb) en termes de vitesse, nous avons fait rouler la voiture à chaque fois avec une batterie, et à différents niveaux (surface plane, pente, haute)



Figure.III.12 : voiture solaire avec Batterie Li-Po



Figure .III.13 : voiture solaire avec Batterie Ni-Cd



Figure .III.14 : voiture solaire avec Batterie Pb

Les résultats obtenus sont indiqués ci-dessous:

Tableau .III.2: comparaison en surface plane

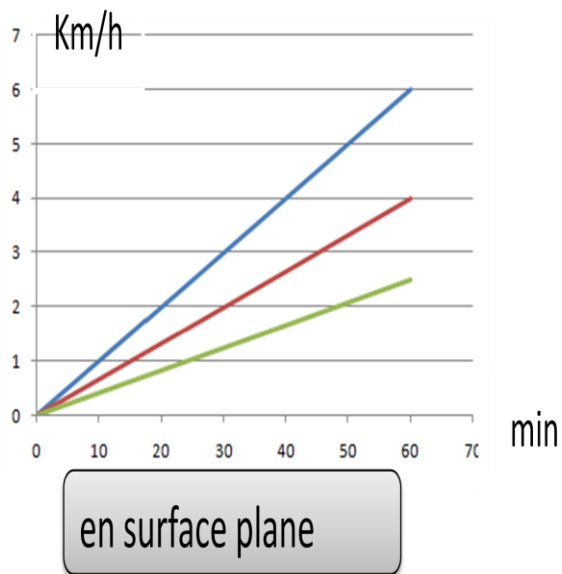
Batterie	Li-PO	Ni-Cd	Pb
Vitesse(km/h)	6	4	2.5

Tableau .III.3: comparaison en pente

Batterie	Li-PO	Ni-Cd	Pb
Vitesse(km/h)	6.65	4.7	3.15

Tableau .III.4: comparaison en haut

Batterie	Li-PO	Ni-Cd	Pb
Vitesse(km/h)	4	3	2



Li-Po
Ni-Cd
Pb

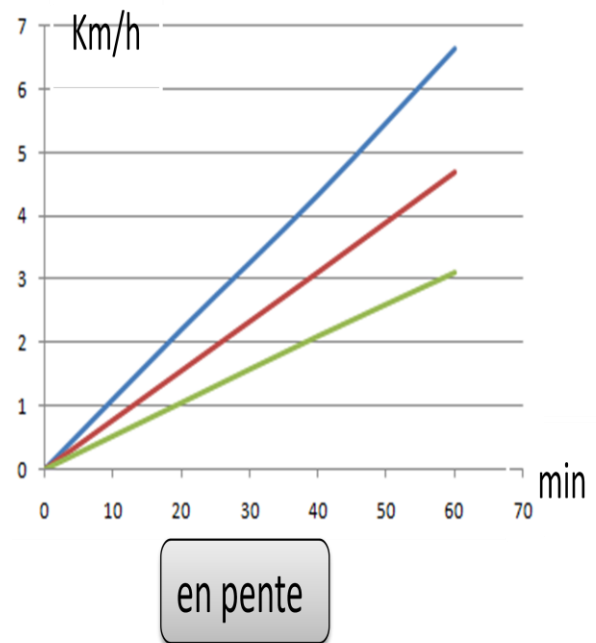
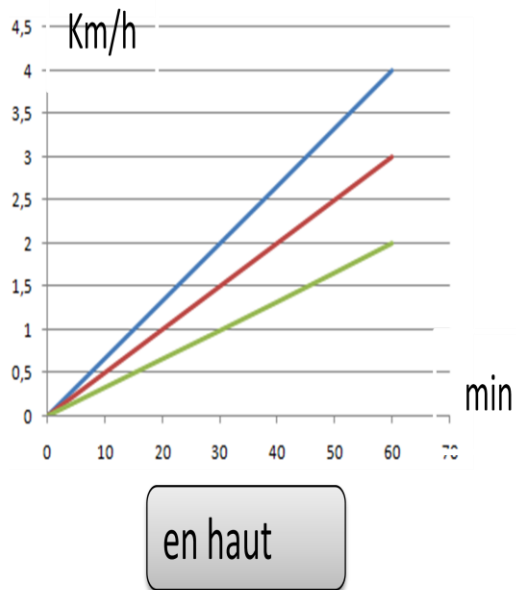


Figure .III.15 Comparez les batteries en vitesse

Tableau .III.5: comparaison en durée de vie des batteries

Batterie	Durée de vie
Li-PO	De 7 à 11 ans
Ni-Cd	De 2 à 4 ans
Pb	De 1 mois à 1 ans

Après les comparaisons décrites ci-dessus, nous avons constaté que la batterie au lithium-polymère est meilleure que les autres et c'est parce que :

- Vitesse car nous avons remarqué qu'elle surpassait les autres types de batteries à tous les niveaux
- Le lithium est le plus léger et le plus réducteur des métaux, de masse atomique trois, juste après l'hydrogène et l'hélium. Il a une densité de 0,5 kg/dm³.
- Tous les matériaux pouvant accueillir en leur sein des ions lithium peuvent servir à la fabrication d'accumulateurs. C'est pourquoi, il existe une grande variété d'accumulateurs au lithium.
- Les accumulateurs lithium offrent aujourd'hui les plus importantes densités d'énergies massiques et volumiques (environ 160 Wh/kg et 400 Wh/l). Ils sont aussi les plus délicats dans leur utilisation et un BMS (Battery Management System) est indispensable pour s'assurer de la meilleure longévité. Ils n'ont aucun effet mémoire.
- La tension d'un accumulateur lithium varie entre 3,0 V et 3,7 V en fonction de sa technologie de fabrication et elle reste stable en charge comme en décharge.
- Le recyclage de ces batteries n'est pas d'actualité, mais les entreprises spécialisées affirment qu'elles seront opérationnelles lorsque les véhicules arriveront en fin de vie.

III.8. Avantages et les Inconvénients

III.8.1. Avantages

La voiture électrique possède plusieurs avantages qui permettront aux consommateurs de faire à terme la différence entre les véhicules électriques et les véhicules thermiques :

- Les véhicules électriques sont dépourvus de pollution sonore puisqu'ils sont totalement « silencieux », ce qui sera favorable à nos oreilles dans les mégapoles où, actuellement, le bruit causé par les voitures est très important et provoque de nombreuses nuisances.

- Les véhicules électriques sont agréables à conduire, avec un roulement qualifié de « doux » en raison d'une accélération continue et progressive car le moteur ne cale jamais (absence d'embrayage).
- L'architecture technique des véhicules électriques est simple il est composés de 6000 pièces de moins qu'une auto traditionnelle.
- Ces véhicules sont plus faciles d'entretien et leurs dépenses sont réduites de 30 à 40% (par exemple le moteur électrique ne requiert pas de vidange). De plus, les occasions de pannes sont 3 fois moins nombreuses.
- Les véhicules électriques ne consomment pas d'énergie dans les embouteillages et les freinages (la voiture se recharge seule). Ils sont donc très adaptés au milieu urbain qui sera la principale mode d'habitat du futur (mégapole).
- Le moteur électrique a un rendement énergétique 3 fois plus élevé que celui d'un moteur thermique.
- Le démarrage est très rapide, il suffit d'appuyer sur un bouton pour quelle se mette en marche (fini les problèmes de démarrages pendant les temps froids d'hiver).
- Le principal avantage[15].

III.9.Conclusion:

Le véhicule solaire résout de nombreux problèmes liés à l'environnement et constitue la meilleure méthode sans pollution. Nous devons les utiliser pour réduire notre dépendance aux combustibles fossiles. Les véhicules solaires ont certains inconvénients comme petite plage de vitesse, le coût initial est élevé. De plus, le taux de conversion de l'énergie n'est pas satisfaisant (seulement 17%). Mais ces inconvénients peuvent être facilement surmontés en menant d'autres recherches dans ce domaine; comme le problème des cellules solaires peut être résolu en utilisant les cellules solaires ultra efficaces qui donnent environ 30-35% d'efficacité. Comme ce champ d'automobiles sera exploré, les problèmes seront résolus. Les voitures solaires ont un énorme marché potentiel et nous devrions commencer à les utiliser de nos jours à la vie de jour. Nous avons déjà réalisé un prototype de véhicule solaire en tant que notre projet et le véhicule fonctionne avec succès sur l'énergie solaire. L'image du véhicule en marche est montrée ci-dessous.



Figure .III.16:Voiture Solaire

Conclusion Générale

Conclusion Général :

Notre pays dispose d'un potentiel énergétique solaire énorme, mais son exploitation reste très limitée, à cause de la politique nationale en matière d'énergie et aussi au manque d'études statistiques et techniques pour la valorisation des énergies renouvelables. Aujourd'hui, la politique a changé et le programme de développement des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique du gouvernement espère atteindre 40% d'énergie renouvelable dans le bilan énergétique d'ici 2030. Ce chiffre est très grand, et connaissant la nature intermittente de l'énergie photovoltaïque et éolienne, le taux de pénétration de ces dernières dans le bilan énergétique ne pourra être réalisé sans des systèmes de stockage aussi grands que diversifiés. C'est dans ce but que nous avons mené une étude comparative des différentes techniques de stockage de l'énergie photovoltaïque. Cette dernière est très abondante en tout point du globe, mais elle est intermittente sur une journée et sur l'année, ce qui nécessite son stockage. En effet, l'intérêt du stockage d'énergie est multiple, il permet une exploitation efficace et continue en sites isolés (en particulier les regroupements villageois dans le grand sud). Connectée au réseau de distribution, l'énergie photovoltaïque permet un soutien à ce dernier en quantité (pendant les heures de pointes) et en qualité (les défaillances du réseau). Cela signifiera une réduction des centrales thermiques d'appoint et par conséquent une réduction considérable des émissions de CO₂. Notre étude nous a permis de montrer qu'il existe d'autres types de batteries qui peuvent concurrencer les batteries au plomb, telles que les batteries Ni-cd, Li-ion et les batteries redox. Les études comparatives sont très importantes pour la sélection préliminaire et pour la faisabilité technique et économique d'un système de stockage. Mais les étapes sur le terrain sont plus importantes et cruciales, donc nous espérons la réalisation de prototype des techniques de stockage à grande échelle (STEP, centrale de stockage thermique à turbine, l'air comprimé, batterie redox), puisque ces techniques nécessitent (contrairement aux batteries classiques) un savoir faire multidisciplinaire donc un temps plus grand pour arriver à maturité dans notre pays. Nous estimons que ces techniques participeront massivement et efficacement à la pénétration des énergies renouvelables et du photovoltaïque en particulier dans le bilan énergétique national.

Bibliographies

Bibliographies

- [1]: Latreche . s et bouzid. k << etude et realisation d'un systeme photovoltaïque a base d'une carte arduinouno >> universite kasdi merbah,ouargla, algerie, 2015.
- [2] : Dr. belaid lalouni sofia <<cours energie solaire photovoltaïque >> , universite a.mira de bejaia 2014-2015
- [3] :Benaouadj mahdi<<controle d'une source hybride batteries/supercondensateurs , rechargee par l'énergie photovoltaïque, pour traction électrique « vehicule hybride »>>université d'el-oued 15-10-2012
- [4] M^{elle} amara karima <<contribution a l'étude de conception d'une centrale photovoltaïque de puissance (1mw) interconnectee au reseau de distribution electrique moyenne tension >> universite mouloud mammeri de tizi-ouzou 2014/2015
- [5] Allal abderrahimi et boukhemis chetate et benattous djilani <<modelisation du stockage de l'énergie photovoltaïque par pltracondensateurs>> universite de bouverdes, aalgerie et universite d'el-oued, algerie. 19-21 mars 2012.
- [6] :Jacques bochirol – ines eduction << le photovoltaïque integre au batiment ensag >> 21 novembre 2012 formation-solaire-photovoltaïque
- [7]: N. achaïbou << introduction a l'étude du systeme de stockage dans un systeme photovoltaïque >> rev. energ. ren. : valorisation (1999) 1-6
- [8]: M. jaquier, <<accumulateurs>>, techniques de l'ingenieur, d940, 1981
- [9]: Daniel desmettre et florence mattera « petit memento sur les batteries a usage solaire », cea-genec, avril 1998
- [10]: https://fr.wikipedia.org/wiki/Accumulateur_lithium-ion
- [11]: Alain ricaud <<modules et systemes photovoltaïques>> sept 2008
- [12]:Web : <http://www.geeby22.fr/page-4287873.html>

[13]: Achaïbou << introduction a l'étude du systeme de stockage dans un systeme photovoltaïque >> rev. energ. ren. valorisation (1999) 1-6

[14]:Web : notions de base sur l'énergie solaire photovoltaïque
https://sitelec.org/download_page.php?filename=cours/solaire_photovoltaique.pdf

[15] : Proceedings of the world congress on engineering and computer science 2010
vol ii
wcecs 2010, october 20-22, 2010, san francisco, usa

[16] : Mohamed ikkiss et mohamed ikkiss et redouane el ferrareare << voitures solaires électriques >> université ibn zohr – agadir 2013

[17] : Daniel joly << forum de technologies >> mai -juin 2017

