



Faculté : Sciences de l'ingénierat

Département : Electrotechnique

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

écialité : Electrotechnique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Licence

Thème:

Etude D'un Véhicule Electrique

Présentées par:

- LOUIZA RAYANE
- DENDEN HAFIDA AYA

Encadrant: **KSENTINI ABDELHAMID**

Grade: **MCA**

BADJI MOKHTAR - ANNABA

Jury de Soutenance :

| | | | |
|---------------------|-----|------------------------|-----------|
| KSENTINI Abdelhamid | MCA | BADJI Mokhtar - Annaba | Encadrant |
| AZZAG El Bahi | Pr | BADJI Mokhtar - Annaba | Président |

Remerciements

Le plus grand merci s'adresse au bon Dieu, le tout puissant de nous avoir accordé le courage et la volonté pour accomplir ce travail.

Nous remercions nos familles et tous nos amis qui nous ont toujours

Encouragé et soutenu durant toutes nos études.

*Nous tenons également, à exprimer nos forts remerciements à notre encadreur Monsieur **KSENTINI**, pour sa disponibilité à tout instant et surtout ses orientations, qu'elles trouvent ici le témoignage de notre*

Haute considération et de notre profond respect.

*Nous remercions le jury **AZZAG EL BAHI** qui a bien voulu accepter d'examiner ce mémoire et à cet égards nous lui présentons nos*

Profonds respects, et notre grande gratitude.

Nous rendons grâce à tous les enseignants du département Electrotechnique, qui nous ont suivis durant notre cursus, et tous ceux qui

Ont contribué, à ce que ce travail prenne forme.

Dédicaces

*Avec un énorme plaisir, un cœur ouvert et une immense joie,
que je dédie mon travail à mes très chers, respectueux et
magnifiques parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour,
leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de
mes études.*

*A mon frère et mes sœurs pour leurs appuis et leur
Encouragement.*

*A tous mes amis et toute ma promotion, et en particulier mon
Binôme LOUIZA RAYANE.*

*A tous ce qui de loin ou de près n'ont pas cessé de m'apporter
leur*

Soutien, pendant mes années d'études.

*Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant
allégués,*

Et le fruit de votre soutien infailible.

DENDEN.

Dédicaces

A toi seigneur DIEU tout puissant créateur du ciel et de la terre.

Je te remercie pour m'avoir donnée la volonté et surtout le courage de mener dans de bonnes conditions ce travail.

A celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, que dieu te garde dans son vaste paradis, À toi mon père.

A la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ; maman que j'adore.

*A mes frères et ma sœur pour leurs appuis et leur
Encouragement.*

*A tous mes amis et toute ma promotion, et en particulier
mon binôme DENDEN HAFIDA AYA.*

*A tous ce qui de loin et de près n'ont pas cessé de m'apporter
Leur soutien, pendant mes années d'études.*

*Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant
allégués,*

Et le fruit de votre soutien infallible.

LOUIZA.



Université Badji Mokhtar- Annaba

Faculté des sciences de l'ingénierat

Département d'Electrotechnique

Rapport sur le travail de mémoire de licence



Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique

Intitulé du mémoire :

Etude D'un Véhicule Electrique

Résumé

« Avant tout, il faut savoir poser les problèmes....C'est précisément ce sens du problème qui donne la marque du véritable esprit scientifique » (Gaston Bachelard, La formation de l'esprit scientifique)

Le véhicule électrique est aujourd'hui présenté comme l'une des solutions alternatives sérieuses au véhicule à moteur à combustion interne, visant à limiter la consommation d'énergies fossiles, ainsi que les émissions de polluants locaux et de gaz à effet de serre. L'évaluation des forces et faiblesses de cette technologie au regard de l'environnement est aujourd'hui limitée, compte tenu notamment du peu de retour d'expérience sur ce type de véhicule

L'objectif de ce travail est de étudier et modéliser le système du véhicule électrique et donner une description sur chaque composant dans ce système.

Dans la première partie de ce mémoire on vas parler sur les systèmes photovoltaïque et le fonctionnement de cellule et leurs caractéristiques principales et les différents types des cellules.

Dans la deuxième partie on vas poursuit une étude sur le système de voiture électrique et on représentera une modélisation et simulation de chaque élément de système.

Chapitre I :

- Figure I.1 :** Analyse spectrale du rayonnement solaire.
- Figure I.2 :** Rayonnement solaire globale sur un collecteur photovoltaïque.
- Figure I.3 :** Représentation schématique d'une pile solaire à jonction PN standard.
- Figure I.4 :** la caractéristique résultante obtenue en association en série.
- Figure I.5 :** la caractéristique résultante obtenue en association en parallèles.
- Figure I.6 :** la caractéristique résultante obtenue en association en parallèles/série.
- Figure I.7 :** L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$.
- Figure I.8 :** L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P=f(V)$.
- Figure I.9 :** L'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$.
- Figure I.10 :** L'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$.
- Figure I.11 :** Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec MPPT.
- Figure I.12 :** Evaluation de la grandeur de la vitesse de rotation de la (MCC).

Chapitre II :

- Figure II.1 :** Schéma du moteur électrique.
- Figure II.2 :** Règle des trois doigts de la main droite.
- Figure II.3 :** Moteur électrique simplifié.
- Figure II.4 :** Schéma de moteur électrique avec la force de Laplace.
- Figure II.5 :** Implantation des éléments d'une voiture électrique à traction avant.
- Figure II.6 :** Implantation des éléments d'une voiture électrique à propulsion.
- Figure II.7 :** Implantation des éléments d'une voiture électrique, moteurs dans les moyeux.
- Figure II.8 :** Exemple de moteur incorporé au moyeu : « Active Wheel » de Michelin Héliez.
- Figure II.9 :** Circuit équivalent de MCC à excitation séparée.
- Figure II.10 :** Circuit équivalent de MCC à excitation shunt.
- Figure II.11 :** Caractéristique couple vitesse d'un MCC à excitation shunt.
- Figure II.12 :** Circuit équivalent de MCC à excitation série.
- Figure II.13 :** Caractéristique couple vitesse d'un MCC à excitation série.
- Figure II.14 :** Un élime de la batterie.
- Figure II.15 :** Graphe de décharge pour une cellule batterie Lithium-ion.
- Figure II.16 :** Influence de la température en état de décharge.
- Figure II.17 :** Graphe de l'état de charge pour une cellule batterie Lithium- ion.

Figure II.18: Modèle électrique équivalent d'une cellule.

Chapitre III :

Figure III.1 : Chaîne de traction asynchrone.

Figure III.2 : Circuit équivalent d'une cellule PV.

Figure III.3 : Modèle d'une batterie sous MATLAB/SIMULINK.

Figure III.4: Courbe de la tension de charge de la batterie.

Figure III.5 : Modèle d'un super condensateur sous MATLAB/SIMULINK.

Figure III.6: Allure de la variation de la tension de l'onduleur MLI.

Figure III.7 : Schéma d'un onduleur triphasé a quatre bras.

Figure III.8 : Circuit de puissance d'un onduleur triphasé.

Figure III.9 : Principe de la commande MLI naturel.

Figure III.10 : Circuit de puissance d'un onduleur triphasé avec la commande MLI.

Figure III.11 : L'allure de tension a la sortie de l'onduleur.

Figure III.12 : Schéma détaillé d'un hacheur.

Figure III.13 : Résultat de la simulation du hacheur.

Figure III.14 : Schéma de la chaine élémentaire de générateur PV et Régulateur.

Abréviations Et Définitions

GPV : GENERATEUR PHOTOVOLTAIQUE

MPPT : MAXIMUM POWER TRACKING

MLI : MODULATION A LARGEURE D'IMPULSION

NPC : NEUTRAL POINT CLAMPING

IGBT: INSULATED GATE BIPOLAR TRANSISTOR DC/DC: CONVERTISSEUR
CONTINU VERS CONTINU

STC: STANDARD TEST CONDITION (1000W/M2, T=25°C, AM1.5)

BOOST: HACHEUR SURVOLTEUR

SOC: STATE OF CHARGE EN FRANCAIS 'ETAT DE CHARGE'

DOD : DEPTH OF DISCHARGE EN FRANÇAIS 'ETAT DE DECHARGE'

NOCT : Nominal Operating Constant Température

DEFLUXAGE : DIMINUER LE FLUX AINSI LE COUPLE SERA
DIMINUEPROPORTIONNELEMENT POUR AUGMENTER LA PLAGE DE
VITESSE.

TABLE DES MATIERES

| | |
|-----------------------------|---|
| Résumé..... | I |
| Introduction Générale | 1 |

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

| | |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| I.1. Introduction | 4 |
| I.2. Généralités sur les systèmes solaires | 4 |
| I.2.1. Spectre solaire..... | 5 |
| I.2.2. Rayonnement solaire | 5 |
| I.2.3. L'énergie solaire | 7 |
| I.3. Cellule photovoltaïque..... | 7 |
| I.3.1. Historique | 7 |
| I.3.2. Structure physique | 8 |
| I.3.3. Rendement | 11 |
| I.3.4. Fonctionnement | 11 |
| I.4. De la cellule au générateur photovoltaïque | 11 |
| I.4.1. Modules photovoltaïques..... | 12 |
| I.4.2. Association de cellule photovoltaïque | 12 |
| I.4.2.1. Association série..... | 12 |
| I.4.2.2. Association en parallèle..... | 13 |
| I.4.2.3. Association en série/parallèle | 13 |
| I.5. Comportement d'un générateur photovoltaïque | 14 |
| I.5.1. Influence de l'ensoleillement..... | 14 |
| I.5.2. Influence de la température | 16 |
| I.6. Les convertisseurs DC-DC (hacheurs) | 16 |
| I.6.1. Hacheur dévolteur (Buck) | 16 |
| I.6.2. Hacheur survolteur (boost) | 16 |
| I.6.3. Hacheur dévolteur-survolteur | 16 |
| I.7. Commande MPPT des convertisseurs DC-DC..... | 17 |
| I.7.1 Qu'est-ce qu'un régulateur MPPT..... | 17 |
| I.8. La charge | 18 |
| I.9. Étude et Présentation d'un système de captage photovoltaïque | 18 |
| I.9.1. Architecture générale d'un système photovoltaïque (PV) | 18 |
| I.10. Conclusion | 19 |

Chapitre II : Étude des systèmes de véhicules électriques

| | |
|-----------------------------------------------------------|----|
| II.1 Introduction | 19 |
| II.2. Notions de voitures électrique et solaire | 19 |
| II.2.1. Voiture électrique | 19 |
| II.2.2. Voiture solaire | 20 |
| II.3. Constituants de la voiture solaire-électrique | 20 |
| II.3.1. Moteur électrique | 20 |
| II.3.1.1. Principe de fonctionnement..... | 20 |
| II.4. Convertisseur de puissance | 22 |
| II.4.1. Configurations :II.4.2.Rendement | 22 |
| II.5. Les moteurs à courant continu | 24 |
| II.5.1. Moteur à excitation séparée..... | 24 |

TABLE DES MATIERES

| | |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| II.5.2. Moteur á excitation shunt | 25 |
| II.5.3. Moteur á excitation série | 26 |
| II.6. Moteur électrique contre moteur thermique | 28 |
| II.7. Généralités sur les batteries | 28 |
| II.8. Regroupement des batteries | 30 |
| II.9. Caractéristiques électriques de la batterie | 31 |
| II.10. Interface des batteries | 32 |
| II.11. Les différents types de batteries | 32 |
| II.12. Les Batteries au Lithium | 33 |
| II.13. Régulation électronique des batteries | 35 |
| II.14. Model électrique équivalent d'un élément de la batterie | 35 |
| II.15. Méthode de système de charge pour une batterie au Lithium-ion | 35 |
| II.16. La charge et la capacité d'une batterie | 37 |
| II.17. Les différents modes de charge pour véhicules électriques | 37 |
| II.18. Les avantages des véhicules électriques | 38 |
| II.19. Conclusion | 38 |

Chapitre III : Modélisation et simulation du système de Véhicules électriques

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| III.1. Introduction | 39 |
| III.2. Modélisation de la chaîne de traction d'un véhicule électrique | 40 |
| III.3. Modélisation du panneau PV | 43 |
| III.4. Modélisation de la batterie | 44 |
| III.5. Simulation de la Batterie | 46 |
| III.5.1. Résultats de simulation de la batterie | 46 |
| III.6. Simulation d'un onduleur | 46 |
| III.6.1. Résultats de simulation | 47 |
| III.7. Modélisation de l'onduleur de tension | 47 |
| III.8. principe de la commande MLI | 50 |
| III.9. Simulation d'un onduleur de puissance avec la commande MLI | 50 |
| III.10. Modélisation du Hacheur | 51 |
| III.11. Résultat de la simulation du hacheur | 51 |
| III.12. Modélisation et simulation du système GPV- batterie | 52 |
| III.12.1. Estimation de l'énergie produite par le module photovoltaïque | 52 |
| III.12.2. Simulation de générateur photovoltaïque avec la méthode MPPT | 52 |
| III.13. Conclusion | 53 |

| | |
|-----------------------------------|----|
| Conclusion générale | 54 |
| Références Bibliographiques | |

INTRODUCTION GENERALE :

Le nombre de véhicules en circulation ne cesse d'augmenter, et même si les nouveaux moteurs thermiques sont de moins en moins polluants, les problèmes de pollution sont de plus en plus critiques, particulièrement pour les gaz à effet de serre responsables du réchauffement de la planète.

Au problème environnemental, s'ajoute également un problème économique du fait que les véhicules à combustion interne ont un très faible rendement concernant l'utilisation des combustibles fossiles 30% au maximum seulement et l'on parle fréquemment ces dernières années des ressources énergétiques qui sont en train de s'épuiser.

Une conséquence est alors la nécessité de prévoir de nouvelles technologies qui permettront de rendre les véhicules moins polluants et plus économes.

Les véhicules électriques sont apparus, dans un premier temps, comme une solution prometteuse. Leur faible autonomie combinée à un coût trop élevé ne leur a pas permis d'être concurrentiels vis-à-vis de leur homologue conventionnel.

L'automobile électrique est jusqu'à ce jour, principalement destinée aux habitants des grandes villes. En effet, son autonomie n'est pas très grande. Le véhicule ne va pas souvent au-delà des 80 km excepté pour ceux qui profitent des dernières avancées technologiques.

Par ailleurs, le véhicule électrique n'a pas d'embrayage. Il n'a pas non plus de boîtier de vitesse. La conception d'un véhicule électrique est articulée autour d'une batterie, d'un moteur, d'un système de commande électronique et de l'électricité. Les batteries servent à emmagasiner l'énergie. Ces dernières peuvent être en nickel-cadmium ou en plomb. Par rapport à la batterie chargée au plomb, la batterie en nickel-cadmium présente l'avantage de pouvoir être entièrement recyclée, ce qui n'est pas le cas de la première.

Toutefois, une autre matière a gagné la faveur des constructeurs : le lithium. Les chercheurs pensent que ce composant prolongerait de façon conséquente l'autonomie du véhicule. En effet, il serait possible que le véhicule puisse parcourir plus de 200 km avec cette batterie de nouvelle génération.

En outre, la batterie au lithium favoriserait un abaissement des coûts de consommation et gagnerait facilement de la sorte la faveur des acheteurs. Il existe également une autre option pour les constructeurs : la batterie en nickel métal-hydrure.

Outre la performance de la batterie, un facteur peut influencer sur l'autonomie de celle-ci : la manière de conduire son véhicule. Si le conducteur fait partie de ceux qui aiment

rouler vite, la batterie se déchargera elle aussi très vite. Ainsi, pour conserver le plus longtemps possible l'autonomie de la batterie, il vaut mieux adopter une conduite assez lente de la voiture.

Cela permettra d'économiser l'énergie de la batterie et par la même occasion d'avoir quelques kilomètres de plus à son compteur. Par ailleurs, il est préférable de conduire sur des tracés qui ne présentent pas un relief trop accidenté.

Il existe deux types de moteurs électriques qui peuvent faire rouler une voiture : les moteurs à courant alternatif et les moteurs à courant continu. Contrairement aux moteurs à courant alternatif, les moteurs à courant continu présentent l'avantage d'un coût de fabrication peu élevé. En outre, ces derniers présentent aussi l'avantage de la puissance.

L'un des seuls inconvénients est le risque de « casse » moteur si le conducteur titille trop souvent cette puissance. Cependant, il ne faudrait pas oublier que les moteurs à courant alternatif ont aussi des adeptes. Ainsi, ils peuvent augmenter l'autonomie de la voiture. En effet, ils transmettent de l'énergie lors des freinages de la voiture. Dans les embouteillages et les petites rues étroites, cela peut être indéniablement utile.

Le moteur électrique, qu'il soit à courant alternatif ou continu, présente l'avantage de donner sa pleine puissance à partir d'un tour/minute réduit, à la différence des voitures à moteur « traditionnel ».

Le système électronique permet de renforcer l'efficacité de l'autonomie de la batterie. La puissance d'une voiture électrique ne tient pas seulement à la bonne conception de son moteur ou bien à la technologie performante de sa batterie mais aussi à l'informatique embarquée.

Cette composante devient de plus en plus importante au fur et à mesure que les progrès dans la fabrication des composants avancent. Certains ingénieurs estiment que les difficultés de recharge de la batterie ne se présenteront plus dans un avenir plus ou moins proche grâce aux nouveaux matériaux qui permettent d'améliorer la conception. Le but poursuivi dans le cadre de ce mémoire est d'étudier le système de véhicule électrique et voir comment on peut stocker l'énergie électrique à base du générateur photovoltaïque pour la restituer au besoin pour l'entraînement de moteur de véhicule électrique.

Au premier chapitre, on fait une description générale, et le principe de fonctionnement de Chaque élément constituant le système photovoltaïque. Nous décrirons le

fonctionnement des cellules photovoltaïques, leurs caractéristiques principales et les différents types des cellules et les avantages.

Au deuxième chapitre on poursuit une étude sur Les composants de système de véhicule et on fait une description sur la voiture électrique et les batteries, le moteur.

Le troisième chapitre est très important, car il présente la modélisation et la simulation de chaque élément du Système par logiciel MATLAB/SIMULINK.

Finalement, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui résume notre étude dans sa partie théorique et simulation des résultats.

CHAPITRE I

Généralité sur les systèmes photovoltaïques

I.1. Introduction :

Les énergies renouvelables se manifestent comme une solution potentielle à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Parmi les moyens de production prometteurs, le photovoltaïque apparaît aujourd'hui comme le plus approprié et le plus abouti à la production d'électricité d'origine renouvelable pour la traction des véhicules électriques.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie de la lumière en électricité. Cette conversion s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basé sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule.

L'association de plusieurs cellules en série /parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale. De nos jours et selon le besoin, l'énergie électrique produite est disponible sous forme d'électricité directe (alimenté une charge) ou stockée en batteries.

Pour bien comprendre ce phénomène, nous avons rappelé dans ce chapitre quelques notions de base sur l'effet photovoltaïque, Le principe de la cellule photovoltaïque et leurs différents modèles et les convertisseurs DC /DC et la charge.

I.2. Généralités sur les systèmes solaires :

L'énergie solaire est la ressource énergétique la plus abondante sur terre. Elle est à l'origine de la majorité des énergies renouvelables, mais elle est très atténuée.

Le rayonnement solaire peut être utilisé pour produire soit directement de l'électricité à l'aide de semi-conducteur photovoltaïque, soit de la chaleur solaire thermique pour le chauffage ou la production électrique [1].

L'énergie solaire se présente bien comme une alternative aux autres sources d'énergie, elle représente un potentiel considérable. En effet, la terre reçoit plus de 3000 h de lumière solaire par année avec un haut niveau d'éclairement. Avec une optimisation des angles de réception, la moyenne annuelle journalière est de 5 à 7 kWh /m²/jour [2].

L'Algérie dispose d'environ 3200 heures d'ensoleillement par an, bénéficiant d'une situation climatique favorable à l'application des techniques solaires.

I.2.1. Spectre solaire :

Le spectre solaire et la distribution spectrale en fonction de la longueur d'onde (λ) ou de la fréquence (ν).

Le Soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde qui varie entre de 0,22 à 10 μm .

La (figure I.1) représente la variation de la répartition spectrale énergétique. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

- 6,4% dans la bande des ultraviolets ($0,20 < \mu < 0,38 \mu\text{m}$).
- 48% dans la bande visible ($0,38 < \mu < 0,78 \mu\text{m}$).
- 45,6% dans la bande des infrarouges ($0,78 < \mu < 10 \mu\text{m}$).

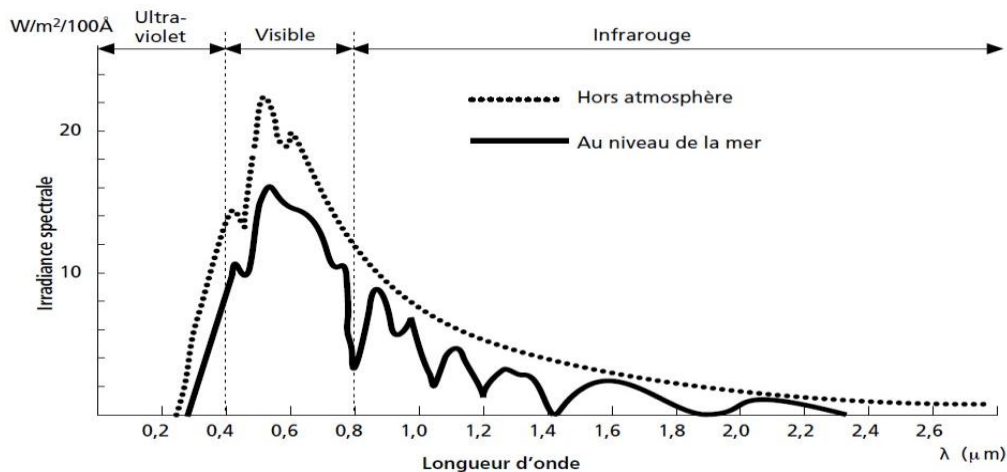


Figure I.1 : Analyse spectrale du rayonnement solaire [3]

I.2.2. Rayonnement solaire :

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus depuis que Langevin et Perrin, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance.

Il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène-hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium, la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius.

Ainsi, à chaque seconde le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement [4].

- Sa lumière, à une vitesse de 300000 km/s.
- Met environ 8 minutes pour parvenir à la terre.
- Distance moyenne soleil-terre est de 150 million kilomètres.
- Sa distribution spectrale de l'atmosphère présente un maximum pour une longueur d'onde d'environ 0.5 m.
- La température de corps noirs à la surface du soleil est d'environ 5780° k [5].
- Diamètre de soleil $D=1,39.10^9$ m.

Au sol, le rayonnement a au moins deux composantes : une composante directe et une composante diffuse (rayonnement incident diffusé ou réfléchi par un obstacle : nuage, sol) Sa valeur dépend de la pression, l'altitude et de l'angle d'incidence des rayons lumineux. L'intégration de l'irradiante sur la totalité du spectre permet d'obtenir la puissance $P(W.m^2)$ fournie par le rayonnement. Pour simplifier on utilise les notions suivantes.

- AM0 : Hors atmosphère (application spatial). $P = 1.36 \text{ KW}.m^{-2}$.
- AM1 : le soleil est au zénith du lieu d'observation (à l'équateur).
- AM2 : spectre standard, le soleil est à 45°. $P = 1.36 \text{ KW}.m^{-2}$.

Les conditions standard de caractérisation sont définis par la norme **IEC-609004** de **International Electrotechnique commission (IEC)** selon une distribution spectrale **AM2** globale (la somme des rayonnements directs et diffus), d'intensité 100 mW/cm^2 et pour une température de cellule de 25°C [6].

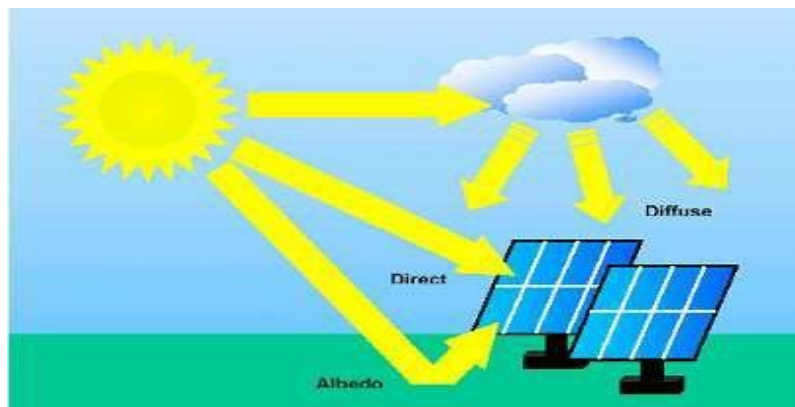


Figure I.2 : Rayonnement solaire globale sur un collecteur photovoltaïque

I.2.3. L'énergie solaire :

La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au soleil. La valeur de l'éclairement est communément prise égale à 1360 W/m^2 . Au niveau du sol, la densité d'énergie solaire est réduit à 1000 W/m^2 à cause de

l'absorption dans l'atmosphère. Albert Einstein a découvert en travaillant sur l'effet Photoélectrique que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie est portée par des particules, les photons.

I.3. Cellule photovoltaïque :

I.3.1. Historique :

Le physicien français Edmond Becquerel décrit le premier l'effet photovoltaïque en 1839 et Einstein en expliqua les mécanismes en 1912, mais cela resta une curiosité scientifique de laboratoire jusqu'à dans les années 50. Becquerel découvrit que certains matériaux délivrent une petite quantité d'électricité quand on les expose à la lumière.

L'effet fut étudié dans les solides tels que le sélénium par Heinrich Hertz dès les années 1870. Avec des rendements de l'ordre de 1%, le sélénium fut rapidement adopté par les photographes comme luxmètre [8].

De rapides progrès furent obtenus dès les années 1950 par les équipes de *Bell Laboratoires* qui fabriquèrent la première cellule au silicium cristallin de rendement 4% à partir du procédé de tirage CZOCHRALSKI. L'industrie des semi-conducteurs contribua largement au développement des cellules solaires.

La taille des cellules PV accompagna la progression de la dimension des wafers de l'industrie des circuits intégrés, de 5,08 cm dans le début des années 70, à 7,62 cm à la fin des années 70, et à 10,16 cm au début des années 80, avant de s'émanciper par la découverte de la croissance de lingots multi cristallins parallélépipédiques qui donnèrent des plaquettes carrées de 10 cm de côté et qui atteignent aujourd'hui couramment 12.5 à 15 cm de côté [8].

I.3.2. Structure physique :

La cellule est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charges libres est très faible par rapport aux métaux. Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devienne libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction).

La cellule la plus commune d'aujourd'hui est une cellule simple au silicium de jonction PN avec un rendement qui arrive jusqu'à environ 17% [9]. Ce matériau semi-conducteur comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p (Figure I.3). Les contacts de la face

éclairée de la cellule ont la structure d'une grille afin de n'occulter qu'une faible partie de la surface (5 à 10%). La face arrière peut être entièrement métallisée.

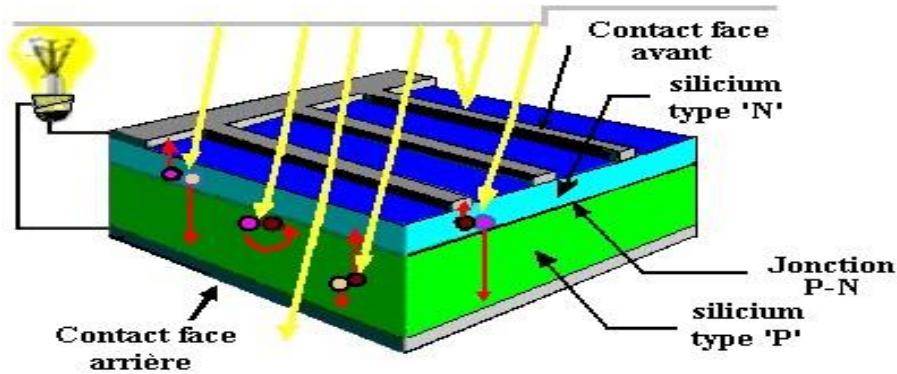


Figure 1.3 : Représentation schématique d'une pile solaire à jonction PN standard.

I.3.3. Rendement :

Le rendement de la cellule PV est un des critères de qualité de ce type de capteur. Ainsi, cette mesure est effectuée selon des normes précises en fixant un type de spectre lumineux, une pression et une température de fonctionnement. Nous parlons ici uniquement du rendement global de conversion d'énergie des photons en électrons traduit par la puissance électrique délivrée par les cellules PV, par rapport à un éclairement de 1000 W/m^2 de type AM1.5 pour pouvoir ainsi effectuer des comparaisons objectives des diverses performances de cellules.

Le rendement dépend du matériau utilisé et des pertes liées à la technologie mise en œuvre pour réaliser une cellule. Parmi les matériaux les plus utilisés et en raison de son faible coût, on trouve le silicium (Si) sous ses différentes formes cristallines (monocristallin, polycristallin ou bien amorphe). Les panneaux PV avec des cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération, Ils sont composés de cristaux de silicium de grande pureté.

I.3.4. Fonctionnement :

Lorsque cette cellule sera exposée au rayonnement, les photons créent des paires d'électron trou avec une énergie plus grande que la bande d'énergie du semi-conducteur. Ceci s'appelle l'effet photovoltaïque, a été découvert par Edmond Becquerel en 1889[8]. Les porteurs de charge nouvellement créés dans la région d'épuisement sont séparés par le champ électrique existant. Ceci mène à une accumulation d'un potentiel de tension appelé photo-voltage. Dès qu'une charge sera reliée à la cellule, cette tension causera un courant (appelé le photo-courant) qui circulera dans le circuit.

I.4. De la cellule au générateur photovoltaïque :

La puissance électrique produite par une cellule industrialisée est très faible typiquement de 1 à 3W avec une tension de moins d'un volt [11].

Une cellule en tant que telle, étant donnée la faible tension à ses bornes ne suffit pas pour constituer à elle seule un générateur PV. Pour élever la tension, les cellules sont commercialisées sous forme des modules photovoltaïques. La plupart des fabricants de modules associent 36 cellules en série.

I.4.1. Modules photovoltaïques :

Afin d'augmenter la tension d'utilisation, les cellules PV sont connectées en série. La tension nominale du module est habituellement adaptée à la charge.

Le module photovoltaïque est donc un ensemble de cellules connectées en série, en parallèle ou en série parallèle. Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension.

De plus, la fragilité des cellules au bris et à la corrosion exige une protection envers leur environnement et celles-ci sont généralement encapsulées sous verre ou sous composé plastique. Le tout est appelé un module photovoltaïque.

Toutefois, il importe de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dues à de l'ombrage, de la poussière, etc.) peuvent endommager les cellules de façon permanente.

I.4.2. Association de cellule photovoltaïque :

I.4.2.1. Association série :

Dans un groupement de N_s cellules en série, la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, alors que le courant traversant des cellules reste le même. La (figure1.5) montre la caractéristique résultante (I_{sc} , V_{sco}) avec :

$$I_{sc} = I_{cc} \quad \text{et} \quad V_{sco} = n s * V_{co} \quad [12]$$

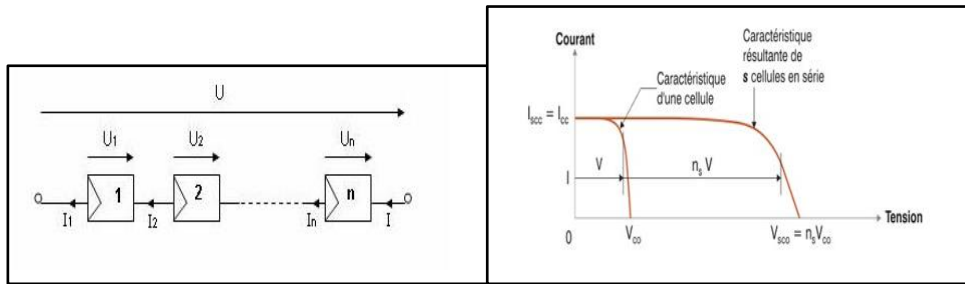


Figure I.4 : la caractéristique résultante obtenue en association en série

I.4.2.2. Association en parallèle :

Dans un groupement de N_p cellules en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par l'addition des courants. La (figure 1.6) montre la caractéristique résultante (I_{pcc} , V_{pco}) Avec :

$$I_{pcc} = n_p * I_{cc} \quad \text{et} \quad V_{pco} = V_{co} \quad [12]$$

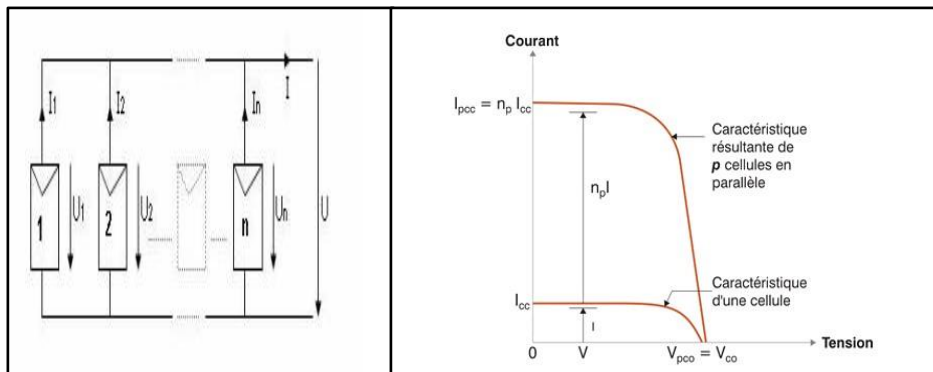


Figure I.5 : la caractéristique résultante obtenue en association en parallèles

I.4.2.3. Association en série/parallèle :

Selon l'association en série et en parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit total et de la tension à vide totale sont données par les relations suivantes :

$$I_{spcc} = n_p * I_{cc} \quad \text{et} \quad V_{spco} = n_s * V_{co} \quad [12]$$

N_p : nombre de cellule en parallèle .

N_s : nombre de cellule en série .

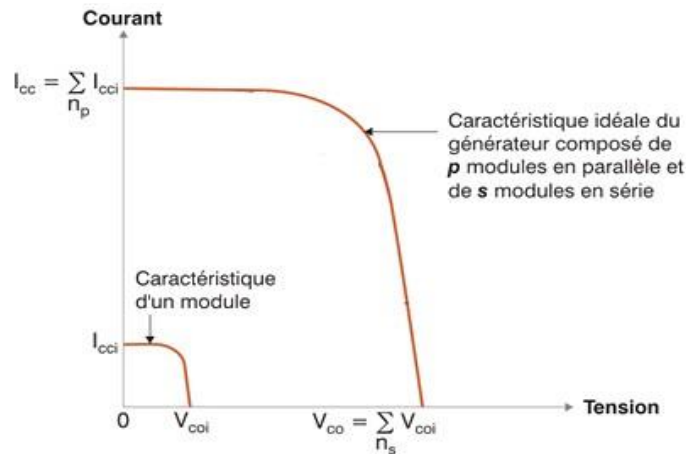


Figure I.6 : la caractéristique résultante obtenue en association en parallèles/série.

I.5. Comportement d'un générateur photovoltaïque :

De par sa constitution, un générateur PV aura un comportement plus ou moins optimisé et pourra ainsi produire plus ou moins de puissance comme nous avons pu le constater dans une première analyse faite au paragraphe précédent.

L'objectif ici dans cette étude est de montrer l'influence de certain nombre de paramètres extérieurs telle que (l'ensoleillement ou irradiation, la température) sur le générateur PV.

I.5.1. Influence de l'ensoleillement :

Une baisse de l'ensoleillement provoque une diminution de la création de paires électron-trou avec un courant changé à l'obscurité. Le courant du panneau solaire étant égal à la soustraction de la photo courant et du courant de diode à l'obscurité, il y'a une baisse du courant solaire I_{cc} proportionnelle à la variation de l'ensoleillement accompagnée d'une très légère diminution de la tension V_{co} et donc un décalage du point P_{max} du panneau solaire vers les puissances inférieures.

Les graphes suivants représentent les caractéristiques $P(V)$ et $I(V)$ respectivement d'un générateur photovoltaïque pour une température constante ($T=25^{\circ}\text{C}$) et un ensoleillement variable.

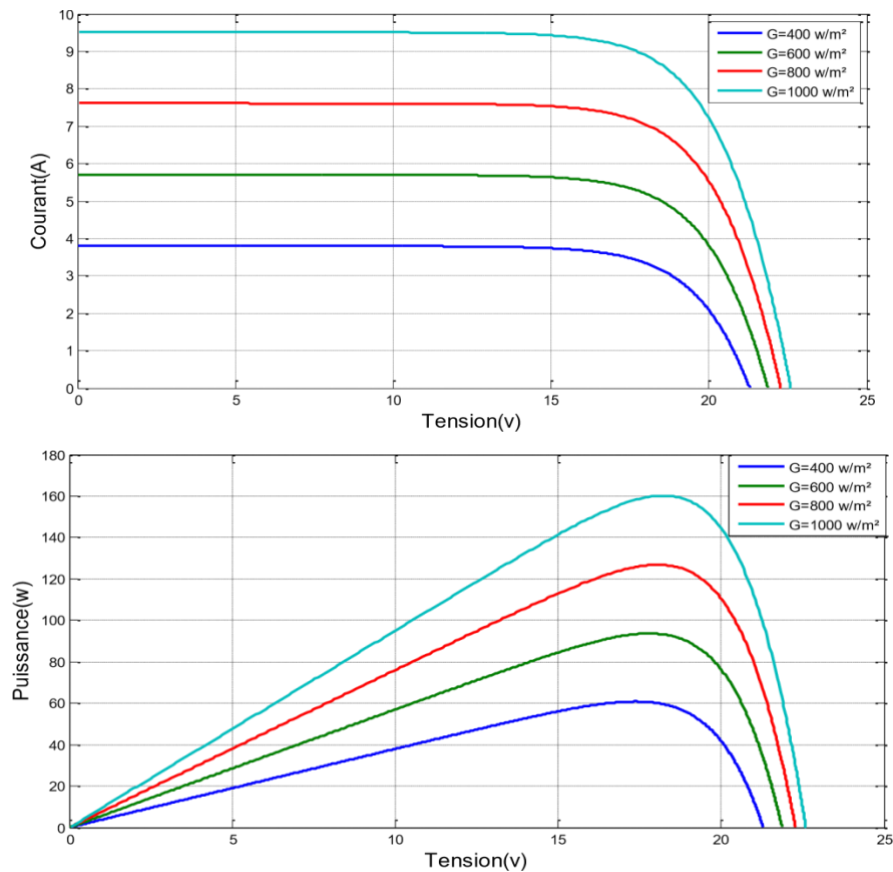


Figure I.8 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P=f(V)$

Il est clair que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, mais reste quasiment identique même à faible éclairement. Ceci implique donc que :

- La puissance optimale de la cellule (P_{\max}) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement.
- Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension.

I.5.2. Influence de la température :

On s'aperçoit que le courant délivré par chaque cellule dépend de la température interne de la jonction PN qui constitue la cellule PV.

Si on considère le réchauffement d'un module PV de 0°C à 75°C et si l'on considère en première approximation que la température face arrière de chaque cellule est proche de la température de la jonction PN, alors on peut considérer l'influence de la température. On s'aperçoit que la tension de circuit ouvert décroît en fonction d'une augmentation de la température. Par conséquent, on perd de la puissance disponible aux bornes du module PV.

Les graphes suivant représentent des courbes $I(V)$ et $P(V)$ pour différentes températures de fonctionnement du module photovoltaïque à une irradiation constante.

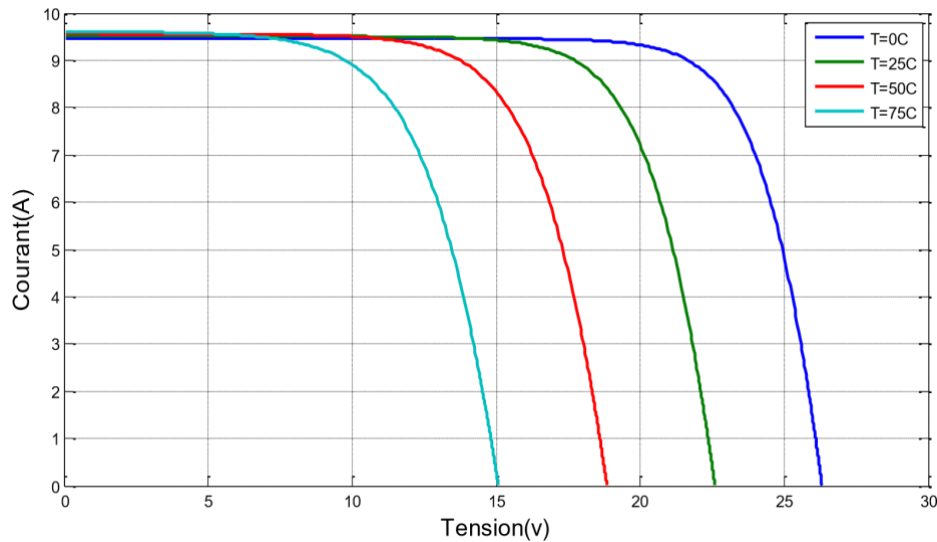


Figure I.9 : L'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$

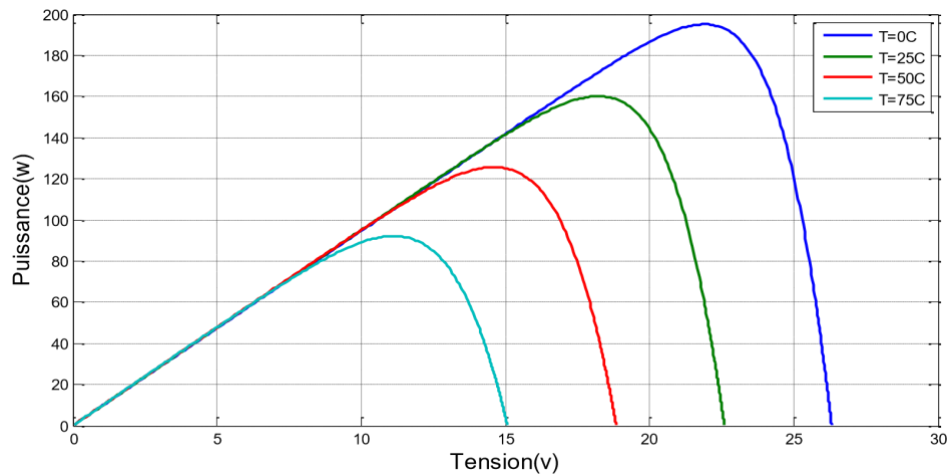


Figure I.10 : L'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$

Nous remarquons que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente.

On en déduit donc que le panneau peut fournir une tension correcte, même à faible éclairage, par conséquent la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement prise en compte. Il est important de savoir que la puissance du panneau diminue environ de 0,5% par chaque degré d'augmentation de la température de la cellule au-dessus de 25 °C.

I.6. Les convertisseurs DC-DC (hacheurs) :

Le rôle du convertisseur DC/DC (dans le cadre du PV) est de faire l'adaptation entre la source (GPV) et la charge pour un transfert de puissance maximal. Ceci est fait en maintenant

la puissance fournie sur ou assez proche du MPP pour n'importe quelles conditions de fonctionnement (rayonnement, température, caractéristique de charge, etc.).

Contrairement au cas général où le convertisseur DC/DC est utilisé pour réguler la tension de sortie, ici c'est plutôt plu la tension d'entrée qui est régulée. La tension de référence (consigne) est alors constante ou imposée par un algorithme de commande.

Si les pertes internes PL du convertisseur sont négligeables, alors les puissances d'entrée et de sortie sont égales.

Il existe plusieurs types des convertisseurs DC-DC. Parmi les quels, on présente le principe des trios types de convertisseur à découpage (dévolteur, survolteur et mixte), utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités ainsi que pour l'adaptation des panneaux solaires avec les déférentes charges.

I.6.1. Hacheur dévolteur (Buck) :

Le convertisseur dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur buck ou hacheur série.

I.6.2. Hacheur survolteur (boost) :

Ce dernier est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de « boost » ou hacheur parallèle, Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure [14].

I.6.3. Hacheur dévolteur-survolteur :

Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des deux convertisseurs précédents, il est utilisé comme un transformateur idéal de n'importe quelle tension d'entrée pour n'importe quelle tension de sortie désirée, [15]

I.7. Commande MPPT des convertisseurs DC-DC :

Nous pouvons classifier d'une manière générale les commandes du MPPT selonle type d'implémentation électronique: analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classifier selon le type de recherche qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée de la commande du MPPT.

La figure. **I.11** montre le diagramme synoptique d'un système photovoltaïque, avec un module MPPT qui a pour entrées la tension et le courant de sortie du module.

Dans la plupart des cas, on fait une maximisation de la puissance fournie par le module solaire.

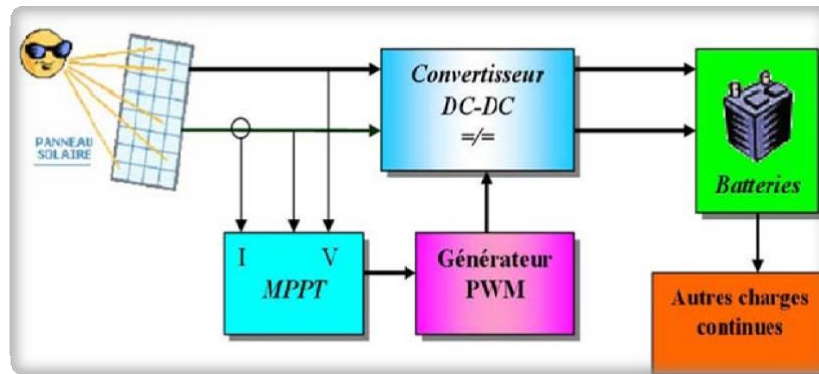


Figure I.11 : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec MPPT .

I.7.1 Qu'est-ce qu'un régulateur MPPT :

Un régulateur MPPT ou Maximum Power Point Tracking (traduction française = « **recherche du point de puissance maximum** ») est un convertisseur électronique DC/DC (courant continu vers courant continu) qui optimise en permanence les paramètres électriques de fonctionnement entre les 3 systèmes suivants :

- Le système photovoltaïque (constitué de un ou plusieurs panneaux solaires)
- Le dispositif batterie (composé d'une ou plusieurs batteries)
- Les applications utilisant l'énergie (moteur, pompe, éclairage, etc.)

I.8. La charge :

La charge et l'équipement électrique alimenté par le système peut être de type continue comme des équipements (télécommunication, moteur à courant continu...) ou bien de type alternatif dans les cas d'usage domestique (maison solaire) ce cas nécessite un onduleur.

I.9. Étude et Présentation d'un système de captage photovoltaïque :

I.9.1. Architecture générale d'un système photovoltaïque (PV) :

L'intérêt essentiel des générateurs photovoltaïques est la possibilité d'autonomie énergétique qu'ils permettent. Les premiers générateurs ont été utilisés en 1958 pour les satellites, puis très largement par la suite pour l'exploration de l'espace. Les premières installations photovoltaïques utilisées au sol datent de 1956 et ont été conçues pour des applications en sites isolés et principalement dans les pays en voie de développement où les réseaux de distribution d'énergie sont généralement restreints aux grands centres urbains.

Un système photovoltaïque (PV) se compose dans son ensemble d'un champ de modules (générateur photovoltaïque) et d'un ensemble de composants qui adapte l'électricité

produite par les modules aux spécifications des récepteurs, comprend tous les équipements entre le champ de modules et la charge finale.

Poser les modules, le câblage et un convertisseur continu/continu permettant d'alimenter le bus continu et de poursuivre le point de puissance maximum, et une charge (moteur à courant continu) La figure I.12 montre le schéma de principe d'un système photovoltaïque (PV) autonome.

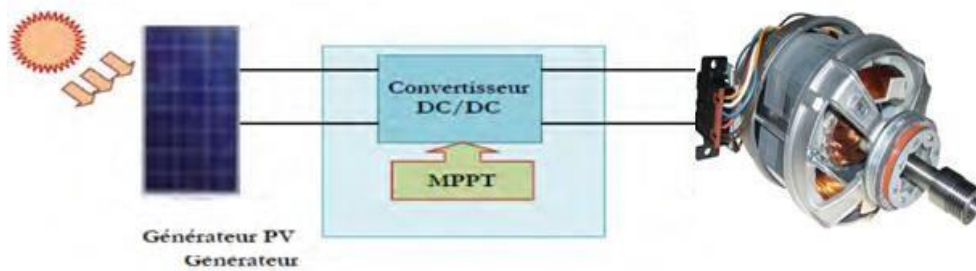


Figure I.12 : Evaluation de la grandeur de la vitesse de rotation de la (MCC)

I.10. Conclusion :

Cet état de l'art préliminaire a permis de présenter les points qu'il faut améliorer sur les systèmes de conversion photovoltaïque (PV). En effet, étant donnée la recrudescence d'intérêts sur les énergies renouvelables, il est nécessaire, si l'on souhaite que le PV connaisse l'essor espéré dans l'avenir, d'améliorer et de sécuriser ce type de conversion d'énergie.

Dans la seconde partie de ce chapitre nous avons exposé brièvement quelques topologies de base des alimentations à découpages qui ne sont rien d'autre que des convertisseurs continus/continus. Ces dispositifs constituent une alternative aux anciennes alimentations stabilisées à caractéristique de sortie statique, où l'on aurait cherché à minimiser les défauts des alimentations stabilisées en terme de taille, d'encombrement, et de mauvais rendement en puissance, d'une part, et un apport de nouvelles fonctionnalités à la structure en terme d'adaptation à toute une gamme de valeurs désirées à la sortie du convertisseur d'autre part. Et cela par une incorporation d'un paramètre de commande d'adaptation, caractéristique qui leur confère une particularité intéressante dans la poursuite des consignes désirées.

Tout le long de ce travail, il est à noter qu'un effort important dans le domaine commence à se faire sentir, notamment du point de vue des publications scientifiques. Aujourd'hui, étant donnée la maturité des travaux dans ce domaine, un effort vers l'industrialisation dans un futur proche pourra être fait sur la base des derniers résultats de recherche.

CHAPITRE II :

Étude des Systèmes de véhicule électrique

II.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous aborderons brièvement les batteries et le moteur de véhicules électriques, La charge des batteries est considérée comme étant le point le plus important pour le développement du véhicule électrique. Le domaine des batteries étant en pleine évolution, la structure de charge devra pouvoir s'adapter à une large gamme de tension variant de 100 à plus de 350 V.

Un chargeur de batterie doit être efficace et fiable. Son fonctionnement dépend des composants, du contrôle, et des stratégies de changement. Actuellement, plusieurs systèmes mise en place

permettent de répondre à l'attente des utilisateurs.

Le chargeur intégré est né à partir de l'idée de réutiliser les éléments déjà existants dans le véhicule tel que les convertisseurs et le moteur, sa conception est conditionnée par la chaîne de traction implantée dans le véhicule.

Le deuxième chapitre se portera sur l'étude des batteries et leurs chargeurs qui sont essentiellement destinés au développement du véhicule électrique Et cela sans oublier les points les plus importants de moteur électrique c'est un composant très simple au cœur de la voiture électrique, il joue sur les forces.

D'interactions (vecteurs forces) entre un électroaimant et un aimant permanent. Il est utilisé pour convertir l'énergie électrique qui provient de la source, en énergie mécanique utilisée pour propulser le véhicule durant les phases de traction, ou inversement l'énergie mécanique en énergie électrique lors des phases de freinage, pour permettre la récupération d'énergie (régénération).

Lors du freinage, la chaîne mécanique devient en partie la source de puissance, et la source d'énergie principale (batterie) devient le récepteur.

II.2. Notions de voitures électrique et solaire :

II.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, ce sera 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.

II.2.2. Voiture solaire:

Le soleil est la source de lumière et de chaleur qui permet aux différents systèmes organiques de survivre, grâce à l'énergie abondante qu'il leur procure. Mais alors, pourquoi ne pas utiliser cette énergie colossale pour palier notre futur manque de 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.

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

II.3.1. Moteur électrique :

II.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 II-1 montre une vue en coupe d'un moteur électrique simple.

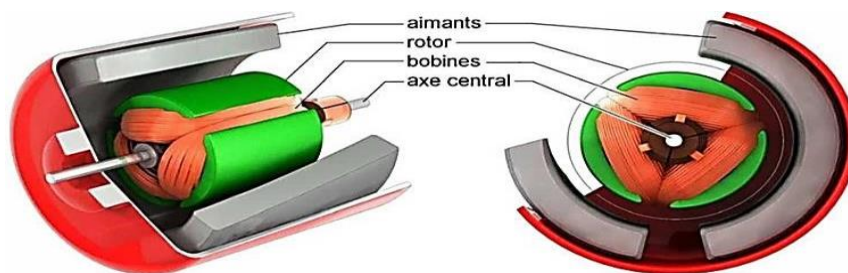


Figure II-1 : Schéma du moteur électrique.

D'après Laplace, un conducteur placé dans un champ magnétique et parcouru par un courant I , est soumis à une force, 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 II-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.

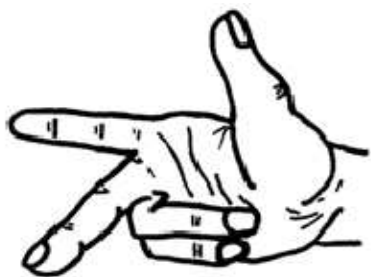


Figure II-2 : Règle des trois doigts de la main droite.

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 II-3 représente de manière simplifiée un moteur électrique. [15]

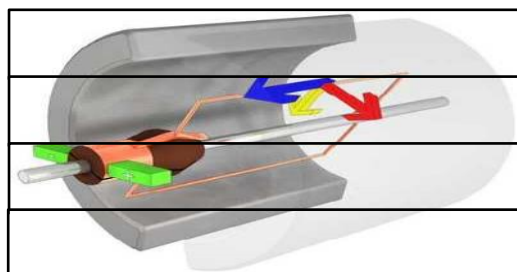


Figure II-3 : Moteur électrique simplifié.

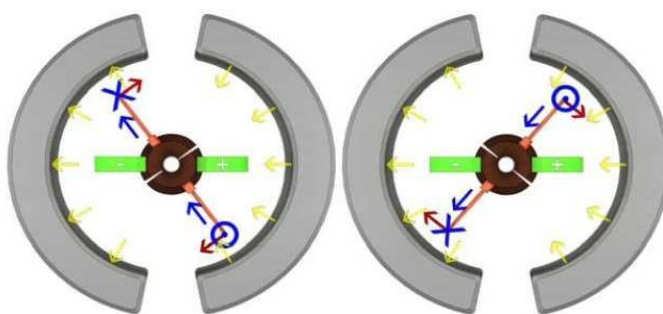


Figure II-4 : Schéma de moteur électrique avec la force de Laplace.

Comme on peut le voir, il y a deux pôles en vert. Ces pôles transmettent le courant au 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 II-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.

II.4. Convertisseur de puissance :

Le convertisseur de puissance est utilisé pour alimenter le ou les moteurs électriques dans les limites admissibles de tension et de courant. Actuellement il existe une grande diversité de structures envisageables pour les véhicules électriques. Dans ces applications, la structure se décompose en deux parties avec des rôles différents, DC et AC. Il faut utiliser des convertisseurs DC/DC, des convertisseurs DC/AC ou des convertisseurs AC/DC.

Les deux types de convertisseurs sont couplés via un bus continu et la distribution de l'énergie électrique dans les véhicules électriques est réalisée par le bus DC. Les principaux composants dans les convertisseurs de puissance sont les semi-conducteurs. [16]

Les semi-conducteurs de puissance actuels peuvent être classés en trois catégories :

- Diode, état fermé ou ouvert contrôlé par le circuit de puissance.
- Thyristor, fermé par un signal de commande, mais doit être ouvert par le circuit de puissance.
- Transistor (Interrupteur commandable à l'ouverture et à la fermeture) ouvert et fermé par un signal de commande.

II.4.1. Configurations :

La motorisation électrique peut être implantée sur l'essieu avant, l'essieu arrière ou les deux (Figures II-5, II-6 et II-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.

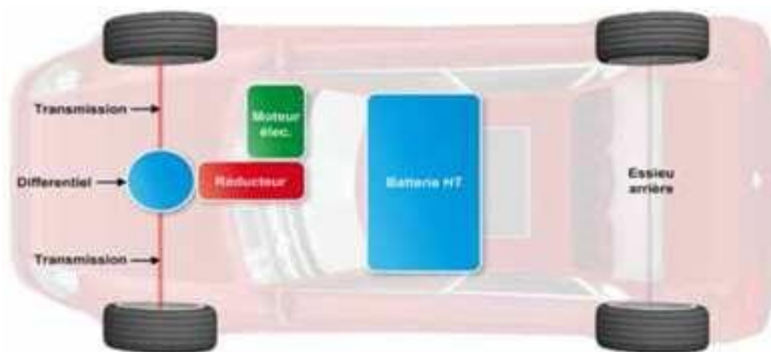


Figure II-5 : Implantation des éléments d'une voiture électrique à traction avant.

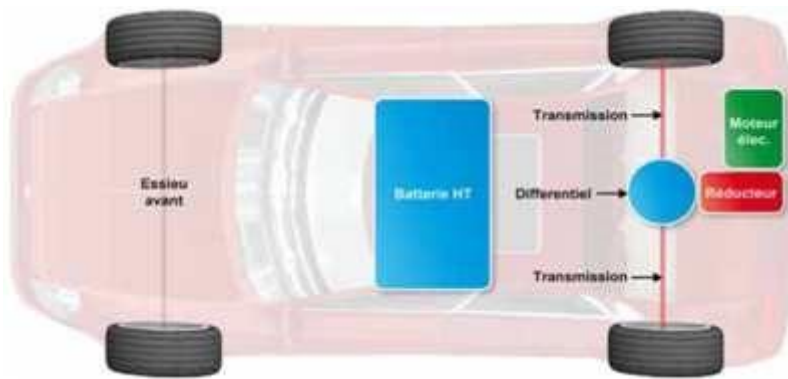


Figure II-6 : Implantation des éléments d'une voiture électrique à propulsion.

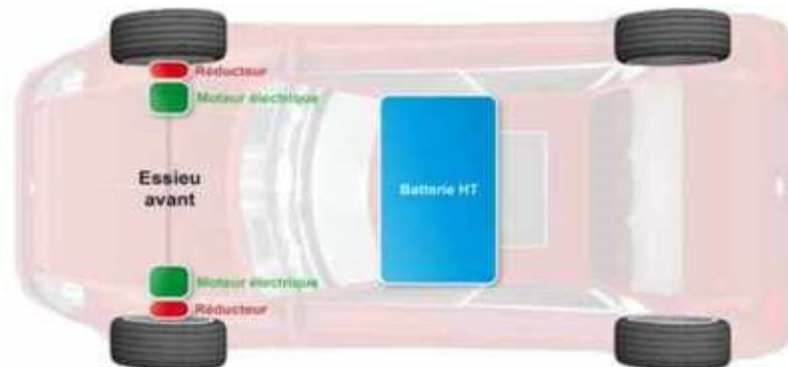


Figure II-7 : Implantation des éléments d'une voiture électrique, moteurs dans les moyeux.

Les moteurs peuvent être incorporés aux moyeux sur l'essieu avant, l'essieu arrière ou les deux (Figure II-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.

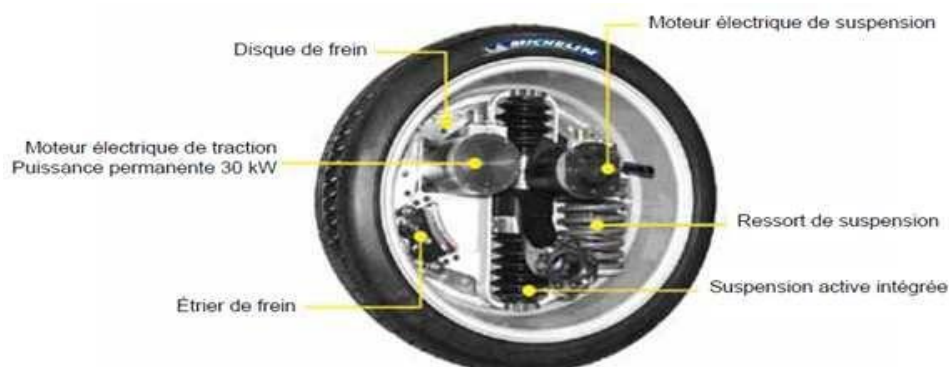


Figure II-8 : Exemple de moteur incorporé au moyeu : « Active Wheel » de Michelin Heulliez.

II.4.2.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.

II.5.Les moteurs à courant continu:

Avant que les alimentations à tension variable soient facilement disponibles, la plupart des MCC étaient obligés de fonctionner à partir d'une seule alimentation continue, généralement à tension constante. Le circuit d'induit et de l'excitation ont donc été conçus soit pour une connexion en parallèle (shunt), soit en série. Les caractéristiques de fonctionnement des machines shunt et série sont largement différentes, et par conséquent, chaque type a sa niche particulière : les moteurs shunts ont été jugés bons pour les applications à vitesse constante, tandis que les moteurs en série étaient (et sont encore) largement utilisés pour les applications de traction [17].

Les caractéristiques de fonctionnement du moteur à excitation shunt, série et séparé sont examinées ci-dessous.

II.5.1.Moteur à excitation séparée

Un MCC à excitation séparée est représenté sur la Figure II.9. L'induit et l'inducteur sont excités à partir de sources continues séparées [18].

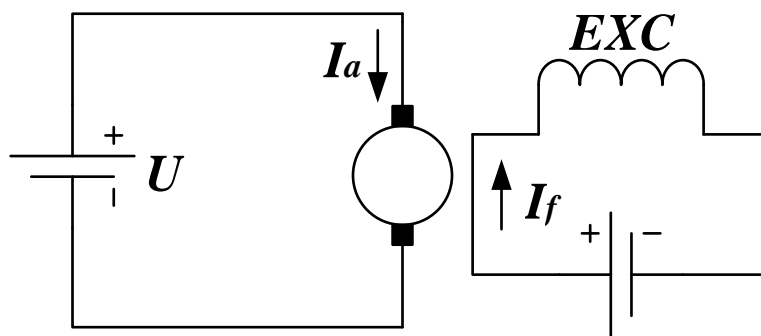


Figure II.9 : Circuit équivalent de MCC à excitation séparée.

La résistance effective de l'induit est donnée par R_a , I_a est le courant circulant dans l'induit. L'équation de la tension est donnée par [19].

II.5.2.Moteur á excitation shunt :

Dans le cas d'un MCC á excitation shunt, l'enroulement d'excitation et l'enroulement d'induit sont connectés en parallèle à travers la même alimentation (Figure. II.10) et donc les enroulements de l'excitation sont exposés à la tension complète [20].

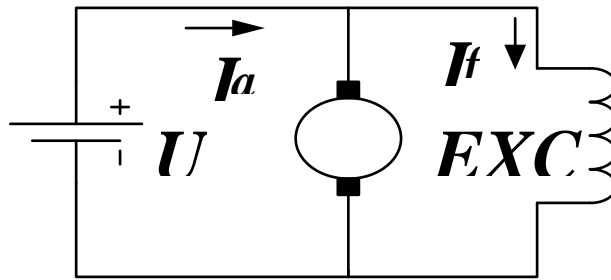


Figure II.10 : Circuit équivalent de MCC á excitation shunt.

D'un moteur MCC shunt est constante et ne varie pas avec la charge mécanique à la sortie. La tension sera constante et à la valeur nominale du moteur, dans ce cas, la courbe de couple/vitesse en régime permanent sera similaire à celle d'un moteur à excitation séparé au flux nominal. L'équation de la tension est donnée par [21].

Ceci est similaire à l'équation d'une ligne droite, et nous pouvons représenter graphiquement la caractéristique couple vitesse d'un MCC á excitation shunt (Figure II.11).

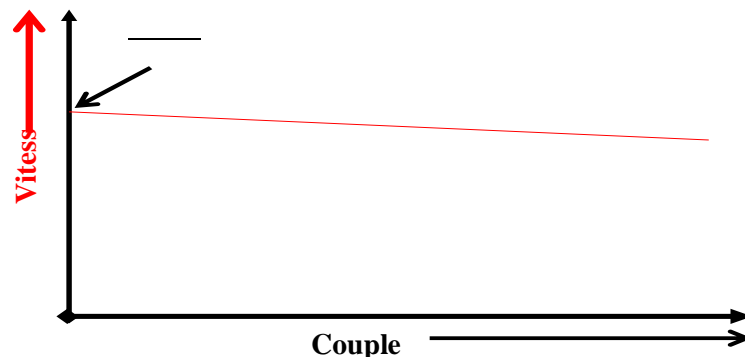


Figure II.11 : Caractéristique couple vitesse d'un MCC á excitation shunt.

Le MCC à excitation shunt est un moteur à vitesse constante, car la vitesse ne varie pas avec la variation de la charge mécanique [22].

II.5.3.Moteur à excitation série.

Dans le cas d'un MCC à excitation série, l'enroulement d'excitation et l'enroulement d'induit sont connectés en série (Figure. II.12).

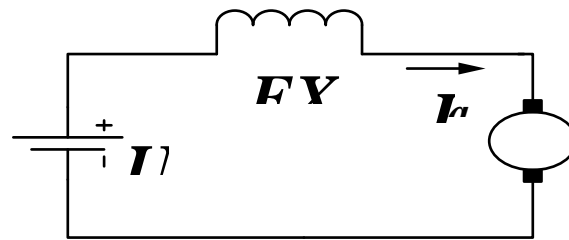


Figure II.12 : Circuit équivalent de MCC à excitation série.

La représentation graphique de la caractéristique couple vitesse d'un MCC à excitation série est illustré sur la Figure. II.13

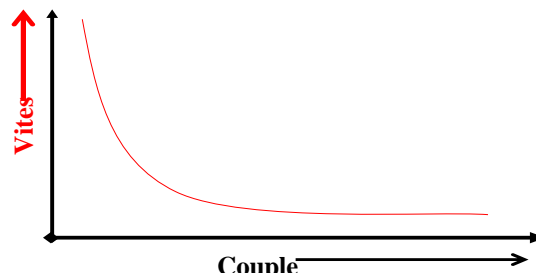


Figure II.13—:Caractéristique couple vitesse d'un MCC à excitation série.

Parmi ces MCC, le MCC à excitation série est utilisé pour des applications de pompage solaire, il peut avoir un couple de démarrage important pour vaincre la résistance de la pompe à eau au démarrage et bien répondre à un courant variable. De plus, le rendement moyen du MCC série est élevé, de l'ordre de 80% à 85%, et ce sur une plage de fonctionnement importante.

II.6.Moteur électrique contre moteur thermique :

Dans un moteur thermique, la conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique est soumise aux limites établies par la deuxième loi de la thermodynamique, à part les pertes dues à la friction et à la différence entre le cycle thermodynamique réel et le cycle parfait (le cycle de Carnot). L'efficacité du moteur électrique est limitée par l'effet Joule et la friction, mais elle peut atteindre des valeurs significativement plus haute dans le cas des moteurs thermiques.

Les voitures électriques pourraient donc avoir une meilleure efficacité au cours de la conversion d'énergie en plus de ne pas produire les émissions associées au processus de combustion (et avec un bruit inférieur). Il faut cependant noter que l'utilisation de voitures électriques, en améliorant la qualité de l'air et des émissions sonores dans les zones urbaines, ne contribue pas nécessairement à la réduction du taux de CO₂, car, dans beaucoup de pays, les énergies électriques sont obtenues à base de combustibles fossiles.

La principale limite des voitures électriques est le fait que leur densité d'énergie soit inférieure en raison de l'utilisation de batteries (surtout avec les batteries acides qui sont traditionnellement utilisées pour les applications automobiles). Avec les batteries acides cette densité est presque 20 fois plus basse qu'avec un réservoir à essence. Autrement dit, pour avoir la même gamme, le poids des batteries devrait être presque 20 fois plus grand que celui d'un réservoir d'essence.

II.7.Généralités sur les batteries:

La batterie est une unité de stockage d'énergie électrique qui fournit un courant continu sous tension électrique continu (DC).

L'effet est dû à la conversion de l'énergie potentielle chimique vers une énergie électrique par réactions entre deux éléments chimiques ayant des potentiels électrochimiques opposés en terme de tension.

Les batteries sont les sources d'énergie pour les véhicules électriques avec assistance solaire, il existe différents types de batterie pour sélectionner une batterie pour l'usage on doit considérer quelques paramètres essentiels tel que l'estimation de vie, la tension nominale, la capacité en Wh, le courant nominal, le poids, une augmentation de courant de charge et décharge va diminuer l'estimation de vie et la capacité d'une batterie, aussi une augmentation de la tension d'une batterie va causer l'augmentation du courant délivré au véhicule ainsi l'évaluation de paramètre courant en A et capacité en Ah est impératif pour désigner une batterie pour la traction d'un véhicule.

Il existe trois architectures de connexion des batteries entre elles pour augmenter la puissance électrique latente à débiter.

II.8. Regroupement des batteries :

Association des batteries en série la tension de l'ensemble sera égale la tension d'une seule cellule multipliée par le nombre des cellules en série le courant reste d'une valeur constante comme montré avec les formules suivantes :

$$V_{bat} = V_{bo} \cdot n_s \quad (V)$$

$$I_{bat} = I_{bo} \quad (A)$$

$$U_{bat} = V_{bo} \cdot I_{bo} \cdot n_s \quad (W)$$

Association des batteries en parallèle, la tension reste constante égale à la tension d'une seule cellule bien que le courant se multiplier par le nombre des cellules que constitue la batterie.

$$V_{bat} = V_{bo} \quad (V)$$

$$I_{bat} = I_{bo} \cdot n_p \quad (A)$$

$$U_{bat} = V_{bo} \cdot I_{bo} \cdot n_p \quad (W)$$

Association en série-parallèle, la tension sera égale a la tension d'une cellule multipliée par le nombre de cellules en séries, le courant sera égale au courant d'une seule cellule multiplie par le nombre des cellules connectées en parallèle.

La puissance totale sera égale au nombre totale des cellules (série et parallèle) multiplie par la puissance unitaire d'une cellule électrique.

$$U_{bat} = V_{bat} \cdot I_{bat} \cdot n_t \quad (\text{en Watt}) \quad , \text{ sachant que : } n_t = (n_s \cdot n_p)$$



Figure. (II.14) : Un élément de la batterie

II.9. Caractéristiques électriques de la batterie :

Une batterie à décharge profonde est conçue pour fournir une quantité de courant stable pendant une longue période de temps, contrairement aux batteries de voitures habituelles qui sont faites pour fournir une très grande quantité de courant sur une courte période de temps.

Les batteries a décharge profonde peuvent être chargées en utilisant l'énergie solaire ou d'autres formes d'énergies renouvelables, ce type de batterie est principalement utilise pour les systèmes qui ne sont pas relies au réseau électrique et qui en sont éloignés.

Les batteries sont caractérisées pour leur capacité en ampère-heure (Ah) et leur tension en volt (V).

Une batterie de puissance à décharge profonde est généralement conçue a fin de fournir 80% de sa charge totale sans subir de dommage, par contre si la décharge dépasse le 80% les batteries peuvent éventuellement être endommagées, Si la batterie a décharge profond est chargée au complet, elle peut avoir une durée de vie environ 100 a 6000 cycles d'utilisation.

En comparaison, la batterie d'une automobile habituelle possède une durée d'environ 30 à 50 cycles.

Les types de batteries recommandées à être utilise pour les générateurs photovoltaïques sont sélectionnés par le facteur de la densité de puissance par unité de masse (W/Kg), et densité d'énergie par unité de masse en (kWh/Kg), rendement énergétique, décharge spontanée, durée de charge minimale, plage de température, cout spécifique et durée de vie.

Il est nécessaire de commencer par des définitions utiles pour comprendre la terminologie :

a-Cellule ou élément : la plus petite unité (un bac contenant deux électrodes et un électrolyte).

On distingue les cellules primaires (non rechargeables) et les cellules secondaires (rechargeables).

b-Pile ou monobloc : association de plusieurs cellules, on appelle « accumulateur » une pile rechargeable (donc formée de cellules secondaires).

c-Batterie : ensemble fonctionnel formé de 1 ou plusieurs monoblocs interconnectés

d-Tension limite de décharge : niveau de tension minimum en dessous duquel la vitesse de dégradation de la batterie devient trop rapide.

e-Capacité : charge électrique que la batterie peut fournir avant d'atteindre sa tension limite de décharge. Ne pas confondre avec la notion de capacité d'un condensateur, la capacité d'une batterie se mesure habituellement en Ah (ampère-heure). Sachant que : 1 Ah = 3600 coulomb. La capacité peut aussi s'exprimer en Wh (watt- heure). 1 Wh = 3600 J (joule). On passe des Ah aux Wh en multipliant par la tension (nominale) de la batterie.

f-Capacité standard : capacité d'une batterie complètement chargée si on la décharge à une température et un courant constants spécifiés. La température est souvent de 20°C. Le courant

est spécifié par le nombre d'heures de la décharge. Donc C10 est la capacité pour une décharge en 10 heures (utilisée pour les batteries ordinaires)

C100 est la capacité pour une décharge en 100 heures (utile dans le cas de batteries solaires).

On a $C_{100} > C_{10}$.

g-État de charge ou SOC (State Of Charge) : rapport entre la capacité résiduelle à un instant donné et la capacité standard.

h-Profondeur de cycle : la batterie est utilisée en cycles courts si la décharge est limitée à quelques pour cent de la capacité standard (batterie de voiture). Elle est utilisée en décharges profondes si la décharge est supérieure à 50% de la capacité standard (cas des batteries solaires).

i-Durée de vie d'une batterie : période après laquelle la capacité de la batterie complètement chargée tombe à 80% de sa valeur initiale.

Pour une utilisation en décharge profonde, la durée de vie est fournie en nombre de décharges. Ce nombre dépend fortement de la profondeur de la décharge, du courant de décharge et de la température.

Même si la batterie est maintenue en permanence en pleine charge, sa durée de vie est limitée. ainsi elle dépend de la température et de la tension à laquelle la batterie est maintenue.

j-Tension de charge maximale ou tension de gazéification : dans beaucoup de batteries, l'électrolyte est une solution aqueuse. Dans ce cas, au-dessus d'une tension limite, l'électrolyse de l'eau devient trop rapide. Il y a alors dégagement d'hydrogène et d'oxygène. Inconvénients de l'électrolyse : arrachage de matière active par les bulles de gaz et perte d'eau (sauf pour batteries « sans entretien » qui contiennent un catalyseur pour recombinaison des gaz. Dans ce cas, la production de chaleur est parfois utilisée pour détecter la fin de charge).

Pour limiter le phénomène d'électrolyse, on définit une tension maximum. La tension de charge maximum peut être dépassée pendant un temps limité.

k-Autodécharge : diminution spontanée de la charge de la batterie. Elle dépend de la température et de la tension de la batterie (donc plus rapide quand la batterie est fortement chargée). on l'exprime en % de la capacité perdue par mois. L'autodécharge est très différente d'un type de batterie à l'autre.

l-Charge d'égalisation : Les batteries sont normalement constituées par la mise en série de plusieurs cellules. Ces cellules peuvent avoir des vitesses d'autodécharge différentes. Après quelques temps, certaines sont donc plus déchargées que d'autres, Lors de la charge, les mauvaises cellules risquent de ne pas être complètement rechargées si la charge s'arrête une fois la tension maximum de charge de l'ensemble atteinte. Ces cellules risquent ensuite de se

retrouver déchargées avant les autres, voire polarisées en inverse et détruites, avant que la tension limite de décharge de l'ensemble soit atteinte.

Pour éviter cela, on termine parfois la charge des batteries par une charge d'égalisation (dépassement pendant un temps limité de la tension maximum de charge) : les bonnes cellules sont le siège d'une électrolyse mais cela permet aux cellules moins bonnes d'être complètement rechargées.

m-Rendement en charge : rapport entre la charge électrique (en Ah par exemple) qu'il faut fournir à la batterie pour la charge et la capacité à charge complète.

n-Rendement énergétique : rapport entre l'énergie fournie à la batterie (en Wh par exemple) pour la charge complète et l'énergie que l'on peut en extraire pendant la décharge. Le rendement énergétique est inférieur au rendement en charge car la tension de la batterie est plus faible durant la décharge que pendant la charge.

II.10. Interface des batteries :

Il s'agit d'éviter les décharges ou les surcharges excessives on doit utiliser des Capteurs :

- de tension (effectifs pour les batteries au plomb)
- de température (car la tension dépend aussi de la température)
- de courant (car la tension dépend aussi du courant) .
- de l'intégrale du courant (à court terme pour limiter la durée de la charge d'égalisation, ou à plus long terme pour obtenir une information sur l'état de charge)

Ces informations peuvent être combinées dans un système sophistiqué impliquant un modèle de la batterie, afin d'obtenir une meilleure estimation de l'état de charge.

II.11.Les différents types de batteries :

- a- Les batteries acide-plomb : Généralement de 6 volt a électrolyte liquide se sont les plus économiques des batteries au plomb, les moins couteuses en (Ah) on retrouve qui ont de cycles de vie allant de 250 a 3000 mais généralement le meilleur rapport Ah se situe au alentour de 400cycles a 50%.

a- Paramètres de la batterie acide-plomb :

| | |
|--------------------------|----------------------------------|
| Densité d'énergie est de | 25a 35 Wh/Kg |
| Puissance spécifique | >100 W/Kg jusqu'a (250W/Kg) |
| Cout spécifique | 80 a 150€ par kWh |
| Autonomie | 50 Km |
| Décharge spontanée | 2% par jour |

| | |
|-----------------------|---------------------------------------|
| Rendement | 80 % |
| Résistance interne | $R_{in} = 0.022$ ('Ohm') |
| Tension de la cellule | 2V avec $R_{ino} = 0.022 \text{ Ohm}$ |
| Résistance totale | $R_{in} = n_s * (0.02 / C10)$ |

n_s : nombre des cellules en série de la batterie.

| | |
|-------------------------|------------------------|
| Temps de charge minimal | 3h (possible 1h a 90%) |
| Garantie de vie | 800 cycles a 80% |

b- Les batteries nickel-cadmium (Ni-Cd) :

| | |
|---------------------------|---------------------------------------|
| Densité d'énergie | 30 a 50 Wh/Kg |
| Densité de puissance | 125 W/Kg |
| $V_{cel} =$ | 1.2V pour une cellule de la batterie. |
| $T =$ | -40 a - 80°C |
| Temps de charge minimal | 1h environ |
| $R_{ino} =$ | 0.06 Ohm |
| $R_{in}(\text{totale}) =$ | $n_s * (0.06 / C3)$ |
| Décharge spontanée | 0.5% par jour |
| Durée de vie | 1200 Cycles pour SOC=80% |
| Cout spécifique | 600 a 800 € /kWh |
| Autonomie | 80Km |

C-Les batteries nickel métal hydrures Ni-MH :

| | |
|------------------------|------------------|
| Puissance spécifique : | 130 W/kg |
| Energie spécifique : | 70-80 Wh/kg |
| Durée de vie | 500 à 800 cycles |
| Cout spécifique | 600 a 1000€ kWh |
| Autonomie | 80 a 100Km |

II.12.Les Batteries au Lithium :

Le lithium est un métal très réactif. Il permet de réaliser des batteries avec une tension élevée par élément (3,2 ... 3,7 V).

On obtient donc une capacité par unité de volume élevée. Comme le lithium est très léger (masse atomique 7 contre 207 pour le plomb), l'avantage est encore plus grand en terme de capacité par unité de masse.

Ces batteries peuvent aussi avoir un faible taux d'autodécharge.

Le principal inconvénient de ces batteries est leur prix, mais ce n'est pas le seul.

En particulier :

- _ La tension élevée des cellules rend impossible l'usage d'un électrolyte aqueux.
- _ Ces batteries sont fragiles : la décharge et surtout la charge doivent être bien contrôlées sous peine de destruction et même d'explosion.

Il existe deux types de batteries :

- Batteries à lithium métallique (particulièrement dangereuses) .
- Batteries lithium-ion et leurs variantes (lithium-polymère, lithium phosphate...), plus sûres mais de capacité un peu plus faible.

Dans les batteries lithium-ion, les ions lithium sont « dissous » dans les électrodes, ce qui explique la grande variété de réalisations possibles. La tension dépend de la concentration des électrodes en ions lithium, elle varie donc fortement en fonction de l'état de charge.

| | |
|----------------------------------|-----------------|
| Densité de puissance très grande | 110 à 160 W/Kg |
| Prix | 600 à 1200€ kWh |
| Autonomie | 150 à 200 Km |
| Densité d'énergie | 160 à 200 Wh/Kg |

Dans l'état actuel, un pack de 250 kg de batterie Li-ion offre jusqu'à 160 km d'autonomie sur le cycle normalisé.

La courbe de tension d'une batterie Lithium est plate durant toute la décharge. Ce qui signifie qu'une batterie chargée à 20% fournira quasiment la même tension qu'une batterie chargée à 80%. Cela évite les problèmes de chute de tension propres aux batteries Plomb et permet de délivrer une énergie constante à l'application qu'elle alimente.

La charge des batteries Lithium a un rendement proche de 100% alors que le plomb avoisine 80%. Ceci est particulièrement important pour les applications solaires où l'on cherche à capter et stocker le maximum d'énergie des panneaux solaires. 20% d'énergie captée est perdue lorsqu'elle est stockée dans une batterie au plomb.

La figure II-15 représente la courbe de décharge d'une batterie en Lithium –ion par variation de la capacité en Ah.

La figure II-16 représente influence de la variation de température sur la courbe de décharge d'une batterie en Lithium –ion.

La figure II-17 représente le cycle charge-décharge d'une batterie en Lithium –ion Par variation de l'état de charge SOC.

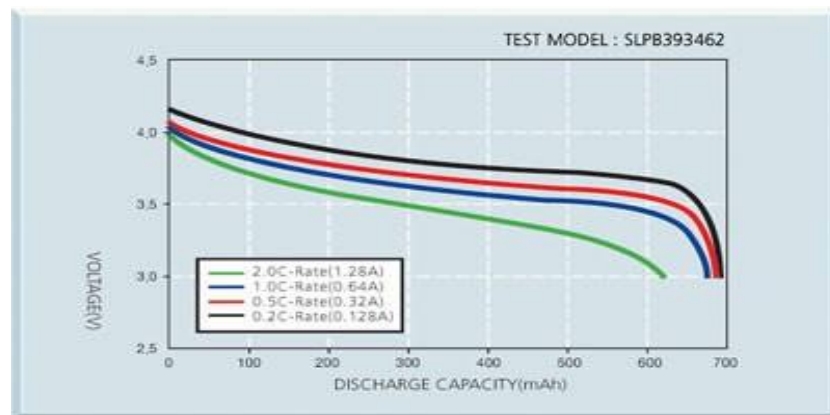


Figure.II.15 : Graphe de décharge pour une cellule batterie Li ion

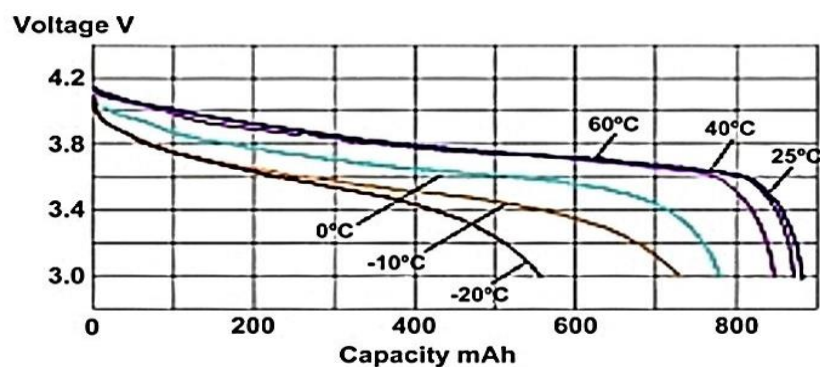


Figure.II.16 : Influence de la température en état de décharge

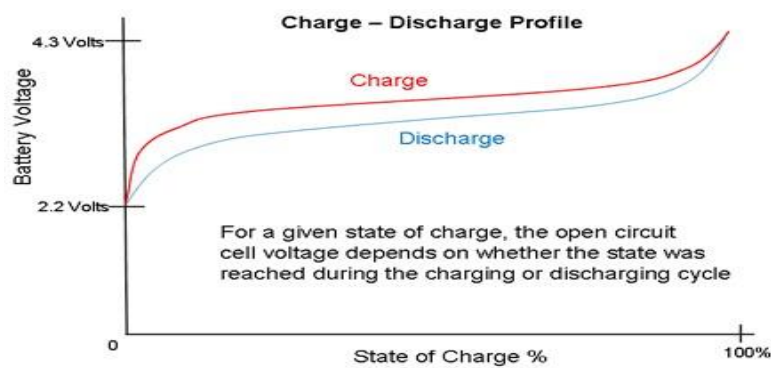


Figure.II.17 : Graphe de l'état de charge pour une cellule batterie Lithium ion

II.13. Régulation électronique des batteries :

Les batteries d'un véhicule sont soumises à des décharges profondes. Pour recharger une batterie soumise à de telles contraintes, un certain nombre de paramètres doivent être respectés pour les préserver :

1-Prise en compte de la température (particulièrement lorsque l'intensité de recharge est élevée, ce qui permet de réduire le temps de charge) 2-le cycle de charge en 3 étapes (boost, égalisation, floating)

La batterie est un des éléments les plus difficiles à modéliser correctement, Il est cependant nécessaire de disposer d'un modèle de la batterie pour prévoir de façon précise l'état de charge de la batterie, pour rendre compte correctement par simulation du comportement d'une installation photovoltaïque équipée de batteries.

II.14. Model électrique équivalent d'un élément de la batterie:

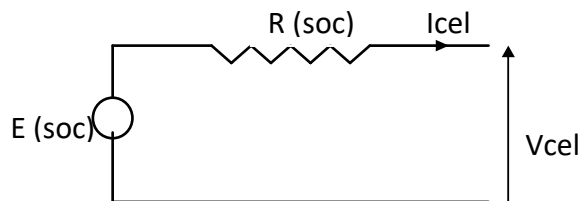


Figure (II.18) : Modèle électrique équivalent d'une cellule

On a choisi comme modèle équivalent d'une cellule une force électromotrice interne E en série avec une résistance interne R , sachant que E et R étant tous les deux fonction de l'état de charge (soc). La batterie est une association en série et en parallèle de cellules.

II.15.Méthode de système de charge pour une batterie au Lithium-ion :

La méthode fréquente utilise pour ce type de batterie et la charge par courant constant et tension constante (CC/CV), les batteries Lithium-Ion sont vulnérables à être endommagées car la limite de tension supérieure de charge est dépassée (sur tension), il est aussi impératif de spécifier une valeur constante du courant de charge que la batterie peut tolérer sans risque de dommage, des précautions spéciales nécessaires sont à prendre pour limiter la valeur de courant maximal de charge et s'assurer que la batterie est complètement chargée continuellement pour éviter le phénomène de surcharge.

Ainsi il est recommandé que la méthode de charge consiste à basculer la charge à une tension constante avant que la tension de la cellule atteigne la tension limite maximale.

Puisque ce n'est pas possible de charger une batterie en Lithium-ion sous le courant de charge C spécifiée par les constructeurs pour toute la durée de la charge alors ce n'est pas possible d'estimer le temps de la charge exact simplement par diviser la capacité emmagasinée en Ah par le courant C spécifique de charge de la batterie, puisque le pourcentage du courant varie d'une façon non linéaire pendant le processus de charge bien que cette équation donne une

estimation approximative de temps de charge d'une batterie vide quand la méthode (cc /cv) a courant et tension constantes est appliquée :

Ainsi le temps de charge(h) = $1.3 * (\text{capacité de la batterie en Ah}) / (\text{le courant de charge constant en A})$.

Quelle que soit la techno Li-ion ou Li-po le principe de charge est le même.

La charge se fait à tension constante et courant limité.

La particularité de la charge des accus au Lithium tient à deux choses primordiales, Ils ne supportent pas la surcharge aussi faible soit elle, et Il faut respecter le niveau de la tension de charge sinon ça ne charge pas. Ceci fait que la fourchette entre la tension minimale de charge et la limite à ne pas dépasser sous peine de surcharge est très faible. Il faut donc que la tension de charge soit régulée très précisément.

Les deux technologies Li-ion et Li-po ont deux niveaux de tensions nominales différentes 3,6V et 3,7V qui impliquent des tensions de charges correspondantes proches mais parfaitement différentes aussi:

Tension nominale 3,6V : Tension de charge 4,1 Volts par élément.

Tension nominale 3,7V : Tension de charge 4,2 Volts par élément.

La tolérance aujourd'hui admise est de +/- 0,05V par élément.

Le courant de charge doit être limité entre C/2 et 1C.

Dans ces conditions respectées, la charge dure entre 2 et 3 heures.

II.16. La charge et la capacité d'une batterie :

La durée nécessaire pour la recharge de la batterie est directement liée à la puissance injectée dans le véhicule.

Cependant plus on veut charger vite, plus la consommation électrique augmente et plus la batterie chauffe.

La solution imaginée à ce problème est l'utilisation de batteries interchangeables, préalablement rechargée, un changement de batterie est aussi rapide qu'un plein du carburant. L'efficacité énergétique de la batterie Lithium-Ion d'un véhicule à moteur tout électrique est estimée de 10 à 14 kWh par 100 Km.

La capacité moyenne des batteries d'un véhicule électrique peut aller jusqu'à 20 kWh en lui assurant une autonomie d'environ 150 Km.

II.17. Les différents modes de charge pour véhicules électriques :

a) Prise domestique : C'est une prise domestique toute simple. Le véhicule électrique est branché directement sur le

Réseau électrique de la maison. Il n'existe que très peu de véhicules dotés d'une 'simple' prise, La Renault TWIZZY en fait partie. Le temps de charge s'établit entre 8 et 11 heures, dépendant De l'état du réseau électrique de la maison. En tout état de cause, l'intensité de charge ne dépassera pas 8 A.

b) Prise domestique et câble équipés d'un dispositif de protection : Constitué d'une prise domestique (1,8 kW) sur laquelle on trouve un boîtier intelligent. C'est à lui qu'incombent le bon déroulement et la sécurité de la charge. Depuis ce boîtier, il est possible de sélectionner l'intensité de charge désirée, sans que celle-ci ne dépasse les 8 A. Il existe néanmoins des prises en 3,2 kW/14 A, mais l'intensité restera bloquée à 8 A. En cas de problème, le boîtier peut stopper à tout moment le processus de recharge estimé entre 8 heures et 11 heures.

c) Prise spécifique sur un circuit dédié : Branchement direct du véhicule électrique au réseau principal de distribution AC avec une fiche spécifique et un circuit dédié d'une puissance de 3,7 kW/16 A ou 22 kW/32 A (triphasé). On peut avoir chez soi ce genre de matériel, appelé alors « Wall box » et installé par un électricien. Ce genre de borne particulière, préconisée par les constructeurs automobiles de voitures électriques ou d'hybrides rechargeables, doit posséder sa propre ligne électrique dédiée afin « d'apporter » le courant adéquat. Le temps de charge (normale ou rapide) oscille entre 1 heure et 8 heures.

d) Connexion courant continu : Le véhicule est alimenté en courant continu par l'intermédiaire d'un chargeur externe lui-même raccordé à l'installation électrique fixe. Dans ce mode, le câble de recharge du véhicule est fixé à demeure à l'installation. Les connecteurs de raccordement sont spécifiques. Le mode de charge en courant continu est réservé à la charge rapide (de l'ordre de 30 min), à des niveaux de puissance et de tension élevés (50 kW sous 500 V) .

II.18. Les avantages des véhicules électriques :

Il est très connu que les voitures thermiques qu'elles soient essence ou diesel polluent l'atmosphère d'une manière très excessive, elles rejettent d'abord du gaz carbonique: le CO₂, bien entendu, une voiture thermique lorsqu'elle parcourt un kilomètre elle rejette 217 gramme du gaz carbonique dans l'atmosphère, Elle rejette également l'oxyde carbone du symbole CO qui est un vrai poison ainsi le NO, SO₂ et d'autres particules de poussières, en revanche, une voiture électrique nous permet d'éviter tout ces gaz, et nous permet de rouler

sans polluer notre environnement , ce ci est considéré comme étant le principale avantage des véhicules électriques.

En plus d'être écologique, le véhicule électrique est économique, il ne consomme pas d'énergie pendant les phases de ralenti, et les batteries se rechargent pendant les phases de décélération. Et les dépenses d'entretien sont réduites (pas de vidange ni de filtre).

Le véhicule électrique est un véhicule très fiable, son moteur électrique est quasi-increvable, et aussi un véhicule agréable à conduire puisque le moteur ne cale jamais.

II.19. Conclusion :

Dans ce chapitre, Nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire, leurs différents types et leur application dans le domaine photovoltaïque, nous avons ensuite expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales ainsi que les paramètres limitant leur rendement et leur coût. Et une synthèse d'assemblage des panneaux et une spécification des différentes zones de fonctionnement Nous avons rappelé aussi les modules photovoltaïques et leurs types d' associations.

Puis on a expose en théorie l'interaction entre panneau photovoltaïque et la batterie de stockage a travers un étage d'adaptation et un régulateur MPPT qui fonctionne selon un algorithme nommé perturbation et observation Et nous avons appris les types de moteurs et comment les connecter, ainsi que leurs utilisations dans le véhicule électrique Et dans cette recherche, nous avons utilisé exactement le moteur thermique comme mentionné précédemment, et ce chapitre est un prélude à les modélisation des éléments de véhicules électriques .

Enfin on a expliqué les déférentes méthodes de charge de la batterie et les systèmes de régulation et le déférent modèle de moteur électrique.

CHAPITRE III :

Modélisation Et Simulation De Système De Véhicule Electrique

III.1. Introduction :

Le véhicule électrique (VE) est un système complexe constitué de plusieurs composants différents (mécanique, électrique, électrochimique, ...) qui sont en interaction. Son comportement est sensible à toute variation des caractéristiques de l'un de ses composants à travers ces interactions.

L'analyse du VE en tant que système nécessite alors la modélisation des différents composants intervenant dans sa chaîne de traction].

Dans ce chapitre nous allons présenter la modélisation de la chaîne de traction d'un véhicule électrique.

III.2. Modélisation de la chaîne de traction d'un véhicule électrique :

Un groupe motopropulseur se compose d'une source d'énergie, électronique de commande, un ou des convertisseurs d'énergie, une ou des machines électriques et un système de liaison mécanique (réducteur de vitesse, différentiel.

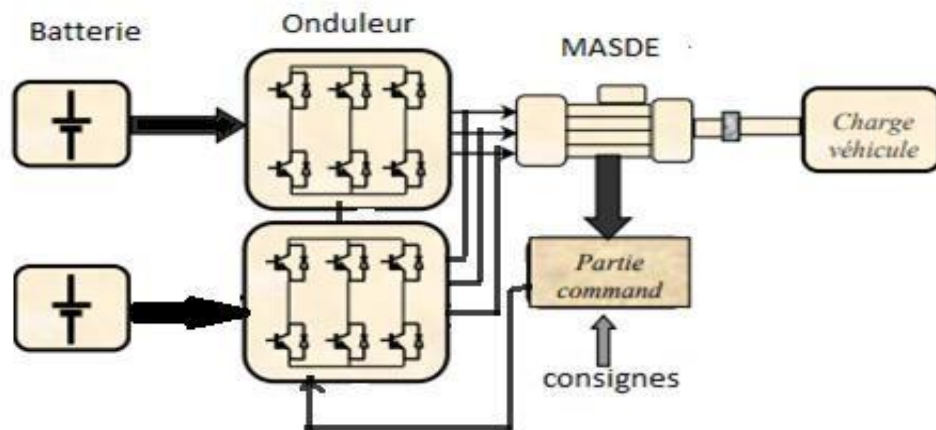


Figure III.1. Chaîne de traction asynchrone

- Source d'énergie : La source d'énergie est une batterie d'accumulateur, ou un super condensateur qui a pour but de fournir (éventuellement de récupérer en cas de freinage) l'énergie électrique.

- Convertisseur : Les onduleurs sont utilisés dans la chaîne de traction pour gérer les échanges énergétiques entre la source d'énergie et le groupe motopropulseur (moteur de traction). L'ondeur de tension permet une alimentation alternative triphasée du moteur. Les semi-conducteurs utilisés sont des IGBT.
- Partie commande : La partie commande reçoit sur son entrée des consignes telles que : le couple demandé par l'utilisateur et la vitesse de rotation de la machine.
- Moteur de traction : Le moteur utilisé est de type asynchrone triphasé double étoiles. L'intérêt de ce type de machine est sa grande fiabilité, sa segmentation de puissance et son rendement plus élevé.
- Partie mécanique : Il existe une transmission mécanique comprenant un réducteur entre le moteur et la roue .

III.3. Modélisation du panneau PV :

Le système PV se compose de plusieurs éléments, y compris le panneau PV, qui est considéré l'élément le plus important dans ce système. Le panneau PV est constitué de cellules solaires qui peuvent transformer l'irradiation solaire en énergie électrique. En général, la cellule solaire produit une tension comprise entre 0.5 et 0.8 volts, selon la technologie des semi-conducteurs et le matériau utilisé. Une cellule solaire typique se compose d'une jonction $P-N$ formée dans un matériau semi-conducteur est similaire à une diode. Le module PV peut se modéliser à partir de l'Equation suivante:

Où :

I_{sat} : le courant de saturation,

K : la constante de Boltzmann,

T : la température de la cellule en Kelvin,

q : la charge de l'électron,

A : le facteur de non idéalité de la jonction,

I_{pv} : le courant fourni par le panneau PV,

V_{pv} : la tension fourni par le panneau PV,

I_{cc} : le courant de court-circuit du panneau PV dépendant de l'éclairement et la température,

R_p : la résistance parallèle caractérisant les courants de fuite de la jonction,

R_s : la résistance série représentant les diverses résistances des contacts et de connexions,

N_s : nombre de cellules connectées en série,

N_p : nombre de cellules connectées en parallèle.

Le modèle de circuit équivalent de la cellule PV est représenté dans la Figure III.2

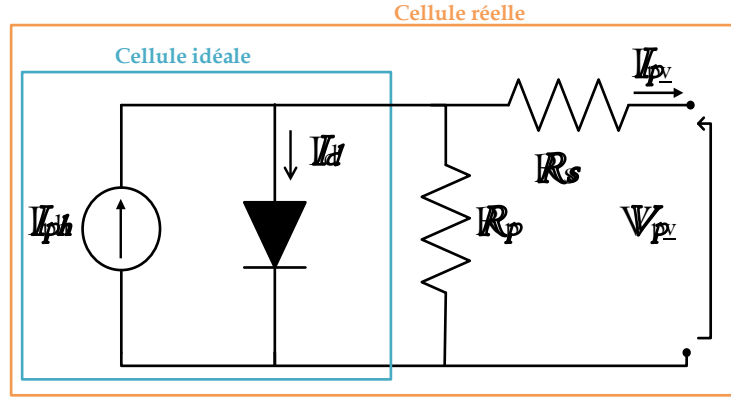


Figure III.2: Circuit équivalent d'une cellule PV.

III.4. Modélisation de la batterie :

Les deux propriétés principales d'une batterie sont sa tension V_{nom} et sa capacité Q_{cell} en Ah. Le produit de ces deux valeurs est une mesure de la quantité d'énergie contenue dans la batterie. Dans une source de tension idéale, la tension devrait demeurer constante en tout temps, jusqu'à ce que la batterie soit complètement déchargée, et ce peu importe la demande de courant. Ainsi l'autonomie d'une batterie devrait pouvoir se calculer directement par l'équation 2.1, où t_{auto} est le temps de décharge et I est le courant demandé.

$$t_{auto} = \frac{Q_{cell}}{I} \quad (2.1)$$

Or, les batteries au lithium n'adoptent pas un comportement idéal car leur tension ne reste pas constante tout au long de la décharge. On a longtemps estimé l'autonomie réelle d'une batterie par la loi de Peukert (eq. 2.2). Le $b > 1$ est une constante propre à chaque batterie, tenant compte de la diminution de la capacité en fonction du courant débité et doit être obtenu expérimentalement.

$$t_{auto} = \frac{Q_{cell}}{I^b} \quad (2.2)$$

La relation de Peukert (eq. 2.2) ne tient pas compte de la température, ni ne permet de calculer la tension de la batterie. C'est l'utilisation des batteries dans les appareils électroniques portables qui a amené les électrotechniciens à s'intéresser à la modélisation des batteries.

Le modèle comprend une source de tension variable. La tension de cette source E_{batt} pour le lithium ion opère selon l'équation (2.3) en recharge ou selon l'équation (2.4) en décharge.

$$E_{batt} = E_0 - R \cdot i - K \left(\frac{Q}{i t - 0.1 Q} \right) i^* - K \left(\frac{Q}{Q - i t} \right) \cdot i t + A \exp(-B \cdot i t) \quad (2.3)$$

$$E_{batt} = E_0 - R \cdot i - K \left(\frac{Q}{it - 0,1 \cdot Q} \right) \cdot (it + i^*) + A \cdot \exp(-B \cdot it) \quad (2.4)$$

Les variables des équations 2.3 et 2.4 sont E_0 la tension en circuit ouvert (V), i le courant de la pile (A), K la constante de polarisation (V/Ah), Q la capacité de la pile (Ah), it la charge actuelle de la batterie (A), i^* est le courant filtré (A), A l'amplitude de la zone exponentielle (V) et B l'inverse de la constante de temps de la zone exponentielle (Ah). Le paramètre R représente la résistance interne (Ω)

$$R = V_{nom} \cdot \frac{1-\eta}{0,2 \cdot Q_{nom}} \quad (2.5)$$

L'équation de la résistance interne est constituée de l'efficacité énergétique η , de la tension nominale V_{nom} (V) et de la capacité nominale de la pile Q_{nom} (Ah). Selon Tremblay (2007), cette formule peut être utilisée pour calculer la résistance interne avec un η de 0,995 lorsque la valeur de la résistance n'est pas disponible à partir des informations du fabricant.

III.5. Simulation de la Batterie :

Le schéma bloc suivant présente celui de la batterie lithium-ion sous environnement MATLAB

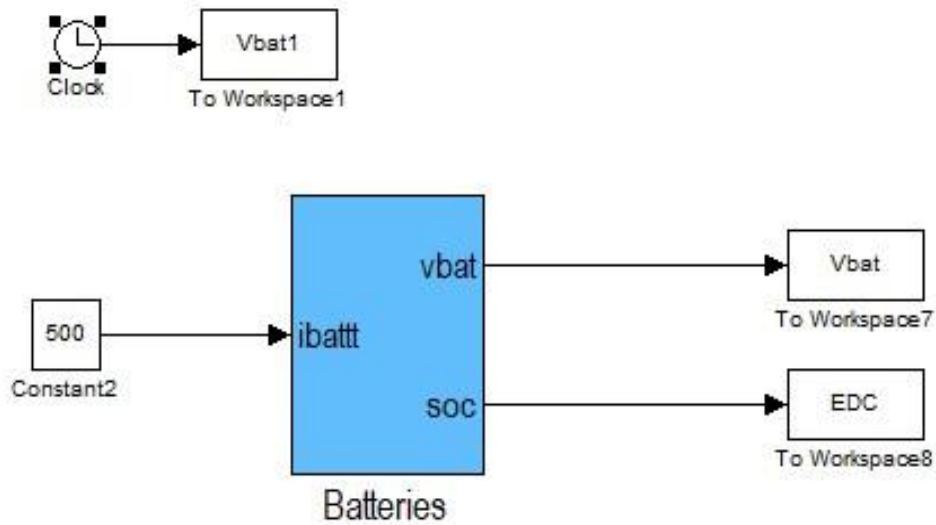


Figure III.3.Modèle d'une batterie sous MATLAB/SIMULINK

II.5.1 Résultats de simulation de la batterie :

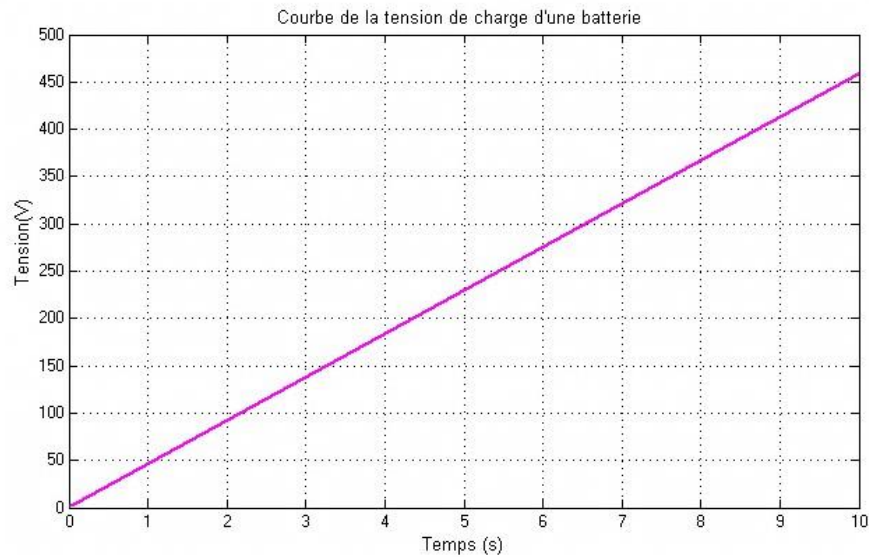


Figure III.4: Courbe de la tension de charge de la batterie

III.6. Simulation d'un onduleur :

III.6.1. Résultats de simulation:

Pour la simulation de l'onduleur, il suffit de créer le modèle d'un onduleur MLI sous l'environnement MATLAB/SIMULINK.

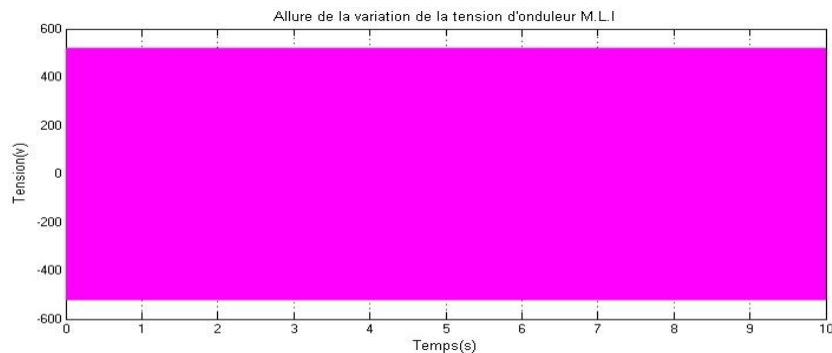


Figure III.6 : Allure de la variation de la tension de l'onduleur MLI

III.7. Modélisation de l'onduleur de tension :

Un onduleur est un convertisseur statique qui assure la transformation de l'énergie d'une source continue en une énergie alternative, qui peut être à fréquence fixe ou variable. Le contrôle de la vitesse et du couple de la MASDE se réalise par action simultanée sur la fréquence et sur l'amplitude de la tension sinusoïdale, à base d'onduleurs de tension à fréquence variable. Chaque étoile de la MASDE est connectée à un onduleur triphasé à commutations commandées. Ce dernier est constitué de trois branches ou chacune est composée de deux paires d'interrupteurs supposés parfaits et dont les commandes sont disjointes et complémentaires; [30] chaque interrupteur est représentée par une paire transistor-diode qui est modélisée par deux états définis par la fonction de connexion logique suivante :

$$f_i = \begin{cases} 1 & \text{interrupteur } i \text{ est fermé (} K_i \text{ conduit, } \bar{K}_i \text{ bloqué)} \\ 0 & \text{interrupteur } i \text{ est ouvert (} K_i \text{ bloqué, } \bar{K}_i \text{ conduit)} \end{cases}$$

Avec : $f_i + \bar{f}_i = 1$ et $i=1, \dots, 3$

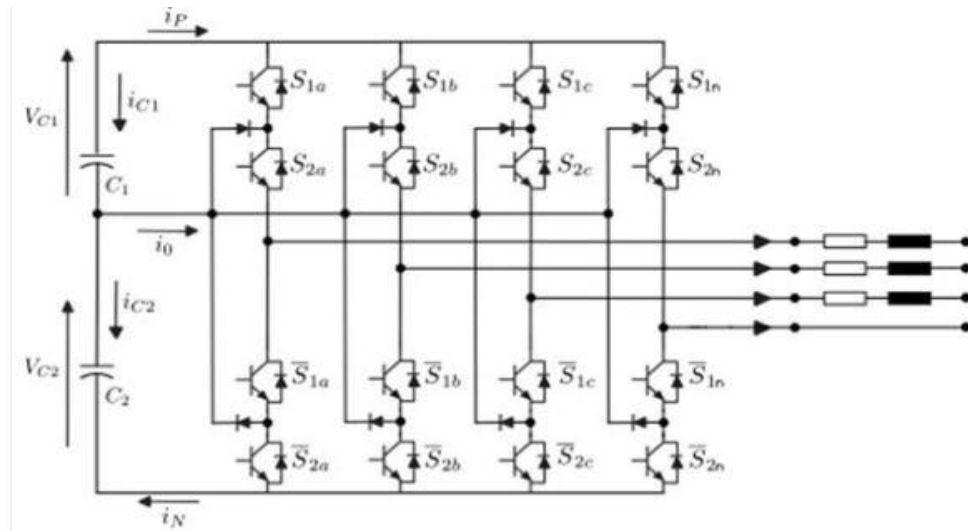


Figure.III.7 : Schéma d'un onduleur triphasé à quatre bras

Les tensions composées sont :

$$V_{AB} = \vartheta_{as1} - \vartheta_{as1} = E (f_1 - f_2) \quad (\text{II.1})$$

$$V_{BC} = \vartheta_{bs1} - \vartheta_{cs1} = E (f_2 - f_3) \quad (\text{II.2})$$

$$V_{CA} = \vartheta_{cs1} - \vartheta_{as1} = E (f_3 - f_1) \quad (\text{II.3})$$

Les tensions simples ϑ_{as1} et ϑ_{bs1} et ϑ_{cs1} forment un système triphasé équilibré tel que :

$$\vartheta_{as1} + \vartheta_{bs1} + \vartheta_{cs1} = 0 \quad (\text{II.4})$$

La résolution des équations (II. 1), (II. 2) (II. 3) et (II. 4) nous donne :

$$\begin{bmatrix} \vartheta_{as1} \\ \vartheta_{bs1} \\ \vartheta_{cs1} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 5})$$

Pour le second onduleur, on obtient :

$$\begin{bmatrix} \vartheta_{as2} \\ \vartheta_{bs2} \\ \vartheta_{cs2} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_4 \\ f_5 \\ f_6 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 6})$$

Un onduleur est un convertisseur continu - alternatif, il est généralement constitué d'une alimentation continue, d'un circuit de puissance et d'un circuit de commande. Selon la commande adoptée il existe plusieurs types, notons la commande 120°, la commande 180°, et la commande MLI.

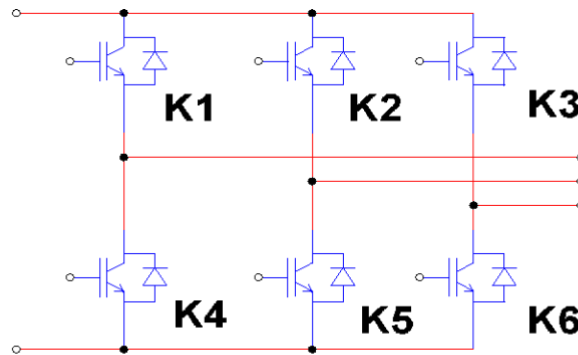


Figure.III.8 : Circuit de puissance d'un onduleur triphasé.

III.8. principe de la commande MLI :

La commande MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) est un signal numérique à période constante mais à rapport cyclique réglable, la tension peut prendre deux valeurs seulement. Dans certains cas très spécifiques (onduleurs à MLI par exemple) on fabrique un troisième niveau en inversant la tension du niveau haut.

Les signaux de commande des interrupteurs de l'onduleur sont déterminés par l'intersection du signal de référence appelé 'modulatrice' avec un signal triangulaire de haute fréquence appelé 'porteuse'. Dans le cas de la MLI triphasée la porteuse est commune pour les trois phases et la modulatrice est propre à chaque phase. On définit deux paramètres caractérisant cette commande

- L'indice de modulation m , égal au rapport f_p/f_r des fréquences de la porteuse et de la référence.
- Le coefficient de réglage en tension r , égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence à valeur crête de l'onde de modulation.

La modulation est dite synchrone si f_p est multiple entier de f_r , elle est asynchrone dans le cas contraire. Si le rapport des fréquences f_p à f_r est multiple de trois les signaux de commande pour les trois phases seront les mêmes mais décalés d'un tiers de période.

La commande MLI est utilisée pour l'onduleur car elle permet d'obtenir un courant dont la forme est très proche d'une sinusoïde

III.9. Simulation d'un onduleur de puissance avec la commande MLI :

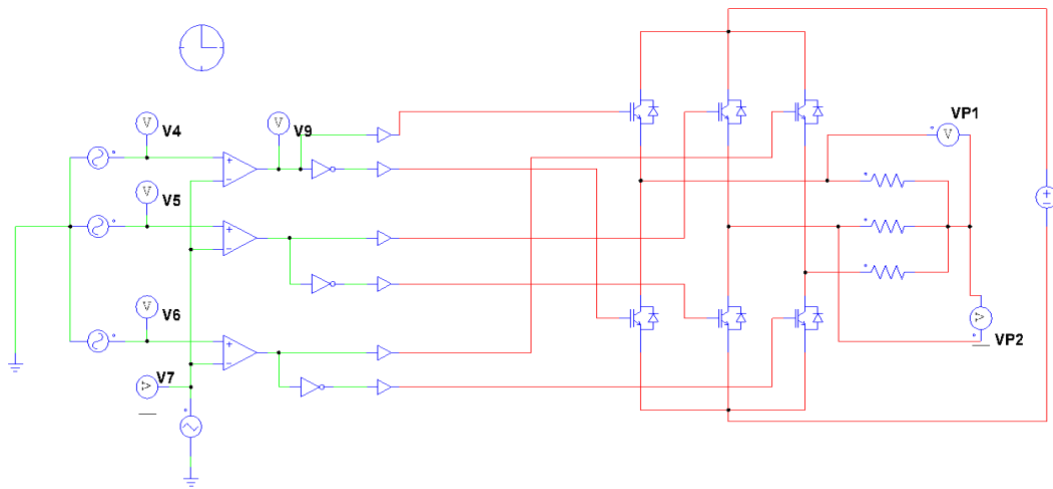


Figure III.9 : Circuit de puissance d'un onduleur triphasé avec la commande MLI.

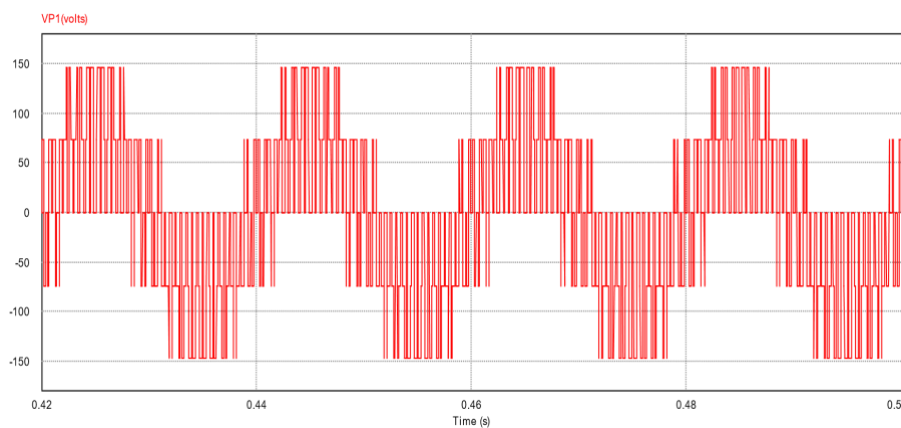


Figure .III.10 : allure de tension a la sortie de l'onduleur.

La figure III.11 présente la tension à la sortie de l'onduleur qui alimente la machine de traction. Ce résultat confirme que la technique MLI est satisfaisante pour la commande de l'onduleur.

III.10.Modélisation du Hacheur :

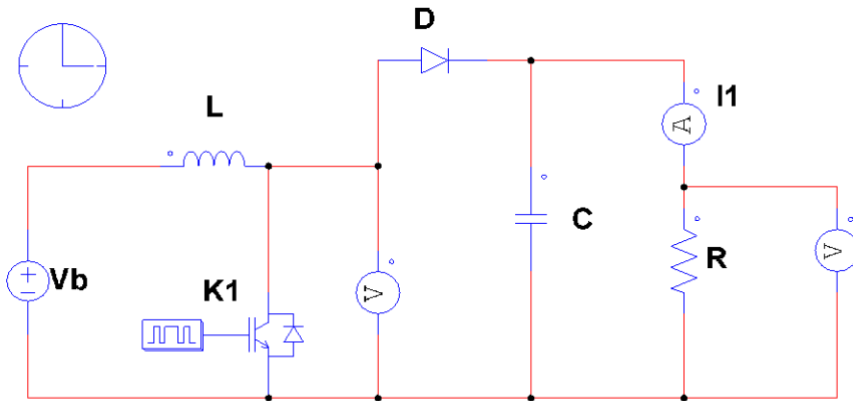


Figure III.11 : Schéma détaillé d'un hacheur.

Dans notre étude, le hacheur utilisé est composé d'un transistor IGBT, et une bobine, branchés comme présenté dans **la figure III 13**.

Pour contrôler l'ondulation du courant dans l'inductance L, il faut étudier les deux états de l'interrupteur K1

a. K1 fermé :

Lorsque K1 est fermé, la tension aux bornes de l'inductance et le courant traversant le condensateur sont égaux à :

$$V_L = V_B \quad (\text{III.1})$$

$$I_c = -V_{ba}/R \quad (\text{III.13})$$

A noter que les ondulations dans le convertisseur sont négligées.

a. K1 ouvert :

Dans ce cas, la tension aux bornes de l'inductance et le courant traversant le condensateur sont égaux à :

$$V_L = V_b - V_{ba}$$

$$i_c = i_L - V_{ba}/R$$

A noter que les oscillations sont négligées dans ce cas aussi.

Donc :

$$V_L = V_b - V_{ba}$$

$$I_c = I_L - V_{ba}/R$$

Enfin, on peut déduire des équations précédentes la tension aux bornes de l'inductance au cours d'une période de commutation :

$$\int_0^T ic(t)dt = -\frac{V_{ba}}{R} \cdot \alpha \cdot T + \left(1 - \frac{V_{ba}}{R}\right) \cdot \alpha' \cdot T \quad (\text{III.14})$$

En regroupant les termes semblables et en égalant la dernière équation à zéro, l'équation obtenue est la suivante :

$$-\frac{V_{ba}}{R} \cdot (\alpha + \alpha') + I \cdot \alpha' = 0 \quad (\text{III.4})$$

La résolution de l'équation précédente nous donne le courant traversant le convertisseur :

$$I = \frac{V_{ba}}{R \cdot \alpha'} \quad (\text{III.5})$$

III.11. Résultat de la simulation du hacheur :

Les résultats de la simulation de la **figure III.13** montre la tension et le courant du hacheur bidirectionnel utilisé

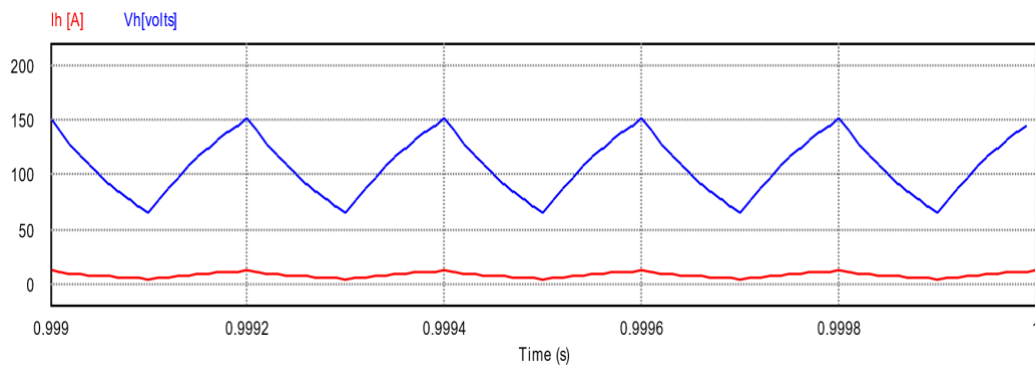


Figure III.12 : Résultat de la simulation du hacheur.

III.12. Modélisation et simulation du système GPV- batterie:

III.12.1. Estimation de l'énergie produite par le module photovoltaïque :

Le modèle **M250-60GET AK BLACK** panneau solaire avec 60 cellules en silicium monocristallin :

a .Paramètres électriques de module photovoltaïque :

$P_{opt} = 245W_c$ (STC)

$U_{opt} = 29V$

$U_{co} = 36,7V$

$I_{opt} = 8.45A$

$I_{cc} = 8.98A$

b. Dimension physique de module photovoltaïque :

Dimension d'une cellule 156*156 mM

Dimension module 1680*990 mM

Le poids de module 24Kg

Surface d'un seul module 1.663 m²

La dimension de la tôle de véhicule type permis une surface 3 fois plus large cela nécessite 3 modules regroupés de modèle proposé

En estime la largeur de véhicule a 1.7 m et la longueur totale de 3.5m

Ce qui permet théoriquement de disposer d'une surface 6 m² approximativement.

Modules seront suffisants pour présenter une surface opérationnelle de 5m².

c. Calcul de la puissance crête produite par le GPV :

La puissance optimale sera égale à : $245 \times 3 = 735 \text{ Wc (STC)}$.

Pour un nombre d'heures d'ensellement 8 heure/jour avec une efficacité moyenne de 80%, l'énergie produite via le panneau solaire sera de l'ordre de : Production électrique = puissance de PV x efficacités x nombre h/jour(Wh)

$$E_{PV} = 735 \times 8 \times 0.8 = 4700 \text{ Wh} \dots\dots\dots = 4.7 \text{ kWh}$$

C'est l'énergie électrique moyenne produite au cours de la journée qui est approximativement égale au rayonnement moyen reçue dans la région méditerranéenne.

D'après le bilan énergétique, Cette énergie sera stockée par la batterie pour fournir une énergie favorisant une autonomie de 60 Km approximativement par jour, avec une vitesse constante moyenne de 50Km/h.

III.12.2. Simulation de Générateur photovoltaïque avec la méthode MPPT :

La figure (III.14) illustre le bloc schématique de SIMULINK du système Photovoltaïque, Système globale (GPV, convertisseur, MPPT, charge) adapté par la commande MPPT « perturbation et observation»:

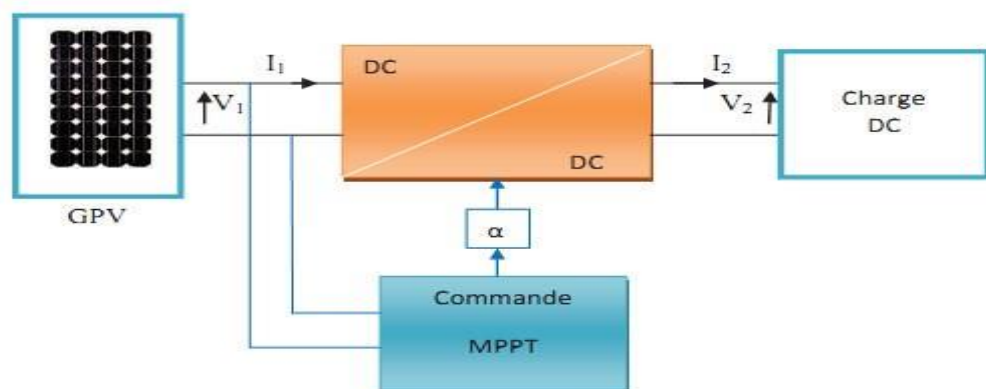


Figure.III.13 : Schéma de la chaine élémentaire de générateur PV et Régulateur

III.13.Conclusion :

A travers ce chapitre nous avons présenté les équations mathématiques utilisées pour la modélisation des convertisseurs utilisées dans les véhicules électriques, ainsi cette validation s'est effectuée par des simulations qu'on a également présenter.

La technique de commande MLI utilisée pour la commande de l'onduleur qui alimente le Moteur et les résultats de simulation on été aussi présenté.

CONCLUSION GENERALE :

L'objectif initial de ce travail était de mettre en place un outil de simulation de l'ensemble de la chaîne de traction de véhicule électrique avec assistance solaire et d'adopter une méthodologie permettant d'étudier l'apport énergétique par le générateur photovoltaïque sur le fonctionnement de véhicule. Le véhicule a été modélisé simplement comme une masse en mouvement soumise à la force motrice et aux forces résistantes.

La boîte de vitesses est considérée comme parfaite et représentée par un rapport de transmission.

Nous avons au cours de ce travail, d'abord présenté le fonctionnement de générateur photovoltaïque avec un régulateur MPPT.

Ce travail a permis de définir le moteur la machine à induction avec une puissance nominale de 37kW.

Nous avons ensuite présenté le dimensionnement des principaux composants de la chaîne de traction électrique en fonction des critères pour un véhicule destiné à un usage urbain.

Afin de préparer la simulation numérique de l'ensemble de la chaîne, nous avons développé la modélisation de La machine à induction représentée dans le référentiel de Concordia par ses équations d'état. Elle est contrôlée dans le référentiel (d, q) par une technique de commande à MLI.

La batterie a été modélisée par un circuit électrique équivalent de THEVENIN constitué par une f.e.m (E) en série avec une résistance R. Ces paramètres ont été identifiés à partir des caractéristiques de décharge et leurs évolutions en fonction de l'état de charge.

Nous avons aussi dimensionné la batterie, de type LI-ION. Elle est constituée de 72 éléments en série et de 7 éléments en parallèle.

Par la suite, nous avons mis en place la stratégie de gestion de l'énergie à bord du véhicule. En fonction de la puissance demandée, de la vitesse du véhicule et de l'état de charge de la batterie.

Perspectives :

Nous avons identifié plusieurs axes dans lesquels on pourrait poursuivre ce travail.

On pourrait tout d'abord améliorer la modélisation par :

- Amélioration de rendement des modules photovoltaïques en optant pour des nouveaux matériaux.
- la prise en compte de la température dans le modèle de la batterie.
- En ce qui concerne la gestion de l'énergie, on pourrait aussi introduire dans la simulation les demandes de puissance des auxiliaires (éclairage, climatisation...).
- Introduire les super-condensateurs comme source d'énergie électrique pour améliorer les performances mécaniques surtout en période d'accélération.
- la prise en compte de l'effet régénératif d'énergie de moteur asynchrone lors de freinage et ralentissement.

- [1] : Fellah Boumediene, «Système hybride photovoltaïque-éolien, de production d'électricité. Application aux sites de Tlemcen et de Bouzaréah» Thèse de Magister, Université Abou Bakr Belkaid de Tlemcen, Décembre 2012.
- [2] : Abdelmalek Bouden, «Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque». Mémoire de magistère, Université de Constantine, Algérie 2008.
- [3] : Éric Schiller« le pompage photovoltaïque» .Manuel de cours, Université d'Ottawa, Canada.
- [4] : K .Kassmi, M .Hamdaoui et F .Olivié, «Conception et modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique» Université Mohamed Premier, Faculté des Sciences, Département de physique, LEPAS, Oujda, Maroc. Revue des energies renouvelables, 451-462, 2007
- [5] : N. Chandrasekaran ,K .Thyagarajah,« Modeling and MATLAB simulation of pumping system using motor powered by solar system» European Journal of Scientific Research,6-13,2011.
- [6] : S .ABADA, « Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur sepic» Mémoire maitre es Sciances, Université laval, Quebec Canada 2011.
- [7] : J .Royer, T. Djiako, E. Schiler et B. Sadasy, «Le pompage photovoltaïque» université d'ottawa ,1998.
- [8] : M.Orgeret, «Les piles solaires, le composent et ces applications» Préface de F.Allest.
- [9] : H.J. Möller. Semiconductors for Solar Cells. Artech House, Inc, Norwood, MA, 1993.
- [10] : S. M. Ait-Cheikh, «Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques», Thèse de Doctorat d'état, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2007.
- [11] : C. Bernard, J.Chauvin, D. Lebrun, J.F Muraz, P. Stassi « Station solaire autonome pour l'alimentation des antennes de l'expérience de radio détection l'observatoire Pierre Auger ».2006.
- [12] : S.ABOUDA. «Contribution à la commande des systèmes Photovoltaïque » Thèse. Université de Reims Champagne-ardenne.2015
- [13] : Antonio Luque and Steven «Hegedus, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering», John Wiley & Sons Ltd, 2003

- [14] : N. Abouchabana, « Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT », Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009.
- [15] : accademai_edu share research . thèse de doctorat .FPO _TEER , projet professionnel .
- [16]: B. DESTRAZ, « Assistance énergétique à base de super-condensateurs pour véhicules à propulsion électrique et hybride », Thèse de doctorat, École Polytechnique Fédérale de Lausanne 2008.
- [17] : K. AMMOUS, « Contribution à la construction systématique des modèles moyens de convertisseurs de puissance », Thèse de doctorat, l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2002.
- [18]: D. Harres, « Chapter 5 - dc motors », in MSP430-based Robot Applications, D. Harres, éd., Oxford : Newnes, 2013, p. 67 -84, isbn : 978-0-12-397012-1. doi : <https://doi.org/10.1016/B978-0-12397012-1.00005-9>.
- [19] :S.-H. Kim, « Chapter 1 - fundamentals of electric motors », in Electric Motor Control, S.-H. Kim, éd., Elsevier, 2017, p. 1 -37, isbn : 978-0-12-812138-2. doi : <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812138-2.00001-5>.
- [20] :A. Hughes et B. Drury, « Chapter one - electric motors – the basics », in Electric Motors and Drives (Fourth Edition), A. Hughes et B. Drury, éd., Fourth Edition, Boston : Newnes, 2013, p. 1 -38, isbn : 978-0-08-098332-5. doi : <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-098332-5.00001-2>.
- [21] :E.-C. CORPORATION, « Chapter 2 - dc motors and generators », in DC Motors, Speed Control, Servo Systems (Third Edition), E.-C. CORPORATION, éd., Third Edition, Pergamon, 1972, p. 2-1 -2-114, ISBN : 978-0-08-021714-7. doi : <https://doi.org/10.1016/B978-0-08021714-7.50007-9>.
- [22] : R. J. Alonzo, « Chapitre 8 - Motors, générateurs, and control », in Electric al Codes, Standards, Recommended Practices and Regulations, R. J. Alonzo, éd., Boston : William Andrew Publishing, 2010, p. 213 -255, ISBN : 978-0-8155-2045-0. doi : <https://doi.org/10.1016/B9780-8155-2045-0.10008-4>.