

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Electrique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Génie électrique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Présenté par :

BENARIF Belkacem

TATOU Abdessalam

Thème:

**Dimensionnement et Modélisation d'un
Système Photovoltaïque Autonome pour
application véhicule électrique**

Soumis au jury composé de :

M ^r Taibi Djamel	MAA	Président	UKM Ouargla
M ^r Benaouadj Mahdi	MCB	Encadreur/rapporteur	UKM Ouargla
M ^r Rezoug Mohamed Redha	MCA	Examineur	UKM Ouargla

Année universitaire 2021/2022

Remerciements

Avant tout, je remercie ALLAH, le tout puissant, de m'avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail de recherche.

Le travail présenté dans cette lettre a été dirigé par le Professeur Benaouadj Mahdi à l'Université de Ouargla, je tiens à lui exprimer ma gratitude et mon appréciation pour sa suggestion et sa direction de ce travail. Ses qualités humaines, son esprit critique, surtout ses conseils, son orientation et sa grande patience nous ont amenés à accomplir beaucoup dans les résultats de ce travail.

Je tiens à remercier les éminents membres du jury, M. Taibi DJamal et M. RazouG Mohamed Redha a de l'Université de Ouargla.

Je tiens à remercier le doctorant à l'Université de Ouargla, M. Tawli Souhil, de nous avoir aidé ainsi que toutes les personnes que je ne pourrais citer ici et qui ont participé directement ou indirectement à la réalisation de ce travail.

Enfin, je ne pouvais pas finir le travail sans remercier toute ma famille au sommet et ma maman et mon papa pour leur soutien et leurs encouragements pour terminer le travail en cours.

ABS	Acrylonitrile Butadiène Styrène
AC	Courant alternatif
Aut_v	Nombre de jours d'autonomie
CC	Courant continu
C_{BV}	Capacité nominale du pack [Ah]
Csc	Capacité totale du module de super condensateurs
DBV	Profondeur de décharge du pack [%]
ΔV_{dc}	Ondulation de la tension aux bornes du condensateur de sortie [V]
ΔI_{max}	Ondulation maximale du courant dans l'inductance [A]
E_p	Energie journalière à produire par les panneaux photovoltaïques [Wh/j]
E_p	Energie journalière produite [Wh/j]
Esc_{max}	Energie maximale contenue dans le stack [J]
E_b	Sa tension à vide [V]
EDCsc	Etat de charge du stack [%]
Esc	Energie contenue dans le stack [J]
E_{BV}	Energie journalière à stocker dans le pack [Wh/j]
FF	Le facteur de forme [%]
F	Fréquence de découpage des convertisseurs [Hz]
G	Eclairement [W/m ²]
G	Rayonnement moyen quotidien [Wh/m ² /j]
H₂	Hydrogène
H₂O	Molécule d'eau
I_{PH}	Photo courant, ou courant généré par l'éclairement [A]
I_{OD}	Courant de saturation de la diode [A]
ICC	Courant de court circuit de la cellule photovoltaïque [A]
I_{OPT}	Courant correspondant au point de puissance maximale [A]
I_{max}	Courant dans l'inductance [A]
i_b	Son courant [A]
I_s	Courant de saturation de la diode (A)
I_{ph}	Photo courant, ou courant généré par la cellule
I_{CCmod}	Courant de court-circuit du module [A]
I_{PPMmod}	Courant au point de puissance maximale du module [A]
K	Constante de Boltzmann ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K)
K	Constante de Boltzmann ($k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{Jk}^{-1}$)
MPPT	Maximum Power Point Tracking

N_{tot}	Nombre total des panneaux
NO_x	Gaz produits principalement par la combustion de combustibles fossiles
η	Rendement énergétique de la cellule photovoltaïque [%]
η	Rendement de la source PV
N_{SCel}	Nombre de cellules connectées en série
N_{pcel}	Nombre de cellules connectées en parallèle
n	Facteur d'idéalité
PPM	Puissance maximale mesurée
PV	Photovoltaïque
PVC	Poly Vinyl Chloride
P_C	Puissance crête des panneaux [W]
q	Charge de l'électron ($q = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C)
Q_{sc}	Quantité de charge stockée dans le module de super condensateurs
R_S	Résistance série [Ω]
R_{SH}	Résistance shunt [Ω]
R_s	Résistance série (Ω)
R_{sh}	Résistance shunt (Ω)
R_{sc}	Résistance série totale du module de super condensateurs
R_b	Sa résistance [Ω]
S	Surface active de la cellule [m ²]
STC	Standard Test Conditions
S_{O_2}	Dioxyde de Soufre
S_{tot}	Surface totale des panneaux installées [m ²]
T	Température de la cellule [K]
t_e	Nombres d'heures d'éclairement équivalentes par jour [h/j]
V_{OC}	Tension de circuit ouvert de la cellule photovoltaïque [V]
V_{OPT}	Tension correspondant au point de puissance maximale [V]
VE	Véhicule Electrique
V_{HP}	Véhicule hybride parallèle
V_{EH}	Véhicule Electrique Hybride
V_b	Tension de la batterie lithium ion [V]
V_{dc}	Tension moyenne du bus capacitif [V]
V_{BVn}	Tension nominale du pack [V]

V_{th}	Tension thermique
V_{C0mod}	Tension en circuit ouvert du module [V]
V_{PPmod}	Tension au point de puissance maximale du module [V]

Résumé

Une véhicule électrique est une solution efficace pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. Bien que ce résultat soit bon, le problème de la limitation de l'autonomie de ce type de véhicule reste à résoudre. Il est conseillé d'avoir une deuxième source d'énergie dans ce cas : qu'elle soit à bord ou non. Le développement et le succès de ce système dépendent de la fourniture des preuves appropriées pour le processus de charge en raison de sa batterie limitée. Les voitures électriques doivent remplacer leurs batteries en les rechargeant avec des charges inductives ou des chargeurs connectés. Cette tâche est directement liée à de nombreux facteurs, dont la masse du véhicule, qui est l'un des facteurs les plus importants affectant la consommation d'énergie. Nous proposons la conception et la mise en œuvre d'un système de recharge hybride. Des modèles des différentes composantes du système seront présentés en détail. Différentes conditions d'éclairage démontreront les performances du système et sa capacité à recharger les sources d'énergie embarquées du véhicule même dans des conditions météorologiques difficiles.

Abstract

The electric car is an effective solution to reduce greenhouse gas emissions. Although this result is good, the problem of limiting the autonomy of this type of vehicle still needs to be resolved. It is advisable to have a second source of energy in this case: whether it is on board or not. The development and success of this system depends on providing proper evidence of the charging process due to its limited battery. Electric vehicles must replace their batteries by recharging them with inductive loads or connected chargers. This task is directly related to many factors, including the mass of the vehicle, which is one of the most important factors affecting energy consumption. We propose the design and implementation of a hybrid charging system. Models of the various components of the system will be presented in detail. Different lighting conditions will demonstrate the system's performance and ability to recharge the vehicle's onboard energy sources even in extreme weather conditions.

ملخص

تعتبر السيارة الكهربائية حلاً فعالاً لتقليل انبعاثات غازات الاحتباس الحراري. على الرغم من أن هذه النتيجة جيدة ، إلا أن مشكلة تقييد استقلالية هذا النوع من المركبات لا تزال بحاجة إلى الحل. يُنصح بالحصول على مصدر ثانٍ للطاقة في هذه الحالة: سواء كان على ظهر المركب أم لا. يعتمد تطوير هذا النظام ونجاحه على تقديم الدليل المناسب لعملية الشحن بسبب بطاريته المحدودة. يجب أن تستبدل السيارات الكهربائية بطارياتها بإعادة شحنها بأحمال استقرائية أو أجهزة شحن متصلة. ترتبط هذه المهمة ارتباطاً مباشراً بالعديد من العوامل ، بما في ذلك كتلة السيارة ، والتي تعد من أهم العوامل التي تؤثر على استهلاك الطاقة. نقترح تصميم وتنفيذ نظام شحن هجين. سيتم تقديم نماذج من المكونات المختلفة للنظام بالتفصيل. ستظهر ظروف الإضاءة المختلفة أداء النظام وقدرته على إعادة شحن مصادر الطاقة الموجودة على متن السيارة حتى في الظروف الجوية القاسية.

Table de Matières

Introduction générale	3
-----------------------------	---

Chapitre I : Généralités sur l'énergie photovoltaïque

I.1. Introduction.....	5
I.2. Production de l'énergie électrique photovoltaïque.....	5
I.2.1. Le rayonnement solaire.....	5
I.2.1.1. Le rayonnement direct.....	5
I.2.1.2. Le rayonnement diffus.....	5
I.2.1.3. Le rayonnement réfléchi.....	6
I.2.2. La cellule photovoltaïque.....	6
I.2.2.1. Généralités.....	6
I.2.2.2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	7
I.2.2.3. Différentes technologies des cellules photovoltaïques.....	8
I.2.2.4. Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....	10
I.2.2.5. Caractéristique courant - tension d'une cellule photovoltaïque.....	11
I.2.3. Le générateur photovoltaïque.....	12
I.2.3.1. Regroupement en série.....	12
I.2.3.2. Regroupement en parallèle.....	13
I.2.3.3. Regroupement mixte.....	13
I.2.4. Influence de la température et Influence de l'éclairement.....	14
I.2.4.1. Influence de la température.....	14
I.2.4.3. Caractéristiques nominales d'un générateur photovoltaïque.....	16
I.2.4.4. Recherche du point de puissance maximum.....	17
I.2.5.1. Les systèmes autonomes.....	17
I.2.5.2. Les systèmes hybrides.....	18
I.2.5.3. Système connecté au réseau.....	19
I.3. Stockage de l'énergie électrique photovoltaïque.....	20
I.3.1. Accumulateurs, piles et batteries : des performances en constante amélioration.....	20

I.3.2. Les batteries au plomb.....	21
I.3.2.1. Constitution d'une batterie au plomb.....	21
I.4. Conclusion.....	22

Chapitre II : Les véhicules électriques

II.1. Introduction.....	24
II.2. Les véhicules électriques solution ultime du problème de CO2.....	24
II.3. Histoire des véhicules électriques.....	25
II.4. Principales configurations des véhicules électriques.....	27
II.4.1. Les véhicules tout électriques.....	27
II.4.1.1. Véhicules électriques à batteries rechargeables par prise de courant.....	28
II.4.1.2. Véhicules électriques à alimentation par pile à combustible.....	28
II.4.2. Les véhicules hybrides.....	29
II.4.2.1. Véhicules hybrides série.....	29
II.4.2.2. Véhicule hybride parallèle.....	30
II.4.2.3. Véhicule hybride série-parallèle.....	31
II.5. Diverses sources d'énergie électrique.....	31
II.5.1. La batterie.....	31
II.5.2. Les super condensateurs.....	33
II.5.2.1. Principe de fonctionnement.....	33
II.6. Différents moyens de recharge des véhicules électriques.....	34
II.6.1 L'échange de batteries.....	34
II.6.2. La recharge par induction.....	35
II.6.3 Les chargeurs branchables.....	36
II.7. Avantages et inconvénient des véhicules électriques.....	36
II.7.1. Avantage.....	36
II.7.2. Inconvénients.....	37
II.8. Conclusion.....	37

Chapitre III : Dimensionnement et modélisation

III.1. Introduction.....	39
III.2. Dimensionnement et modélisation du système de recharge.....	39
III.2.1. Présentation du système de recharge.....	39
III.2.2. Dimensionnement énergétique du système de recharge.....	39
III.2.2.1. Dimensionnement du système photovoltaïque autonome.....	40
III.2.2.1.1. Dimensionnement de la source PV.....	41
III.2.2.1.2. Dimensionnement des batteries lithium ion.....	42
III.2.2.1.3. Dimensionnement des supercondensateurs.....	44
III.2.2.2. Dimensionnement des convertisseurs continu/continu (hacheurs).....	46
III.2.2.2.1. Convertisseur DC-DC lié aux panneaux PV.....	46
III.2.2.2.2. Convertisseur DC-DC lié aux batteries.....	48
III.2.2.2.3. Convertisseur DC-DC lié aux super condensateurs.....	48
III.3. Modélisation du Système hybride autonome.....	49
III.3.1. Modélisation de la source PV.....	49
III.3.2. Modélisation des batteries lithium ion.....	52
III.3.4. Modélisation d'un super condensateur.....	54
III.4. Conclusion.....	57
Conclusion générale.....	58

Références Bibliographiques



Liste de figure

Chapitre I : Généralités sur l'énergie photovoltaïque

Figure I.1. La cellule photovoltaïque	6
Figure I.2. Principe d'une jonction PN	7
Figure I.3. Etapes de production d'électricité par une cellule photovoltaïque	8
Figure I.4. Cellule monocristalline.....	8
Figure I.5. Cellules photovoltaïques poly-cristallines	9
Figure I.6. Cellule amorphe.....	9
Figure I.7. Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque	10
Figure I.8. Caractéristique I-V d'une cellule PV pour un éclairement et une température donnés.....	11
Figure I.9. Caractéristique courant-tension pour Ns cellule en série	12
Figure I.10. Caractéristique courant-tension pour Np cellules en parallèle.....	13
Figure I.11. Groupement de Ns et Np modules en série et en parallèle	14
Figure I.12. Caractéristiques I-V en fonction de la température.....	14
Figure I.13. Caractéristiques P=f(V) en fonction de la température.....	15
Figure I.14. Caractéristiques I=f(V) en fonction de l'éclairement	15
Figure I.15. Caractéristiques P=f(V) en fonction de l'éclairement	16
Figure I.16. Système autonome.....	18
Figure I.17. système hybride (photovoltaïque et éolienne	19
Figure I.18. Système connecté au réseau	19
Figure I.19. Vue en coupe d'un élément au plomb ouvert (batterie de démarrage)	21
Figure I.20. Vue éclatée d'une batterie de démarrage.....	22

Chapitre II :Les véhicules électriques

Figure II.1. Dodge EV.....	24
Figure II.2. Centrale au charbon.....	25
Figure II.3. Exemple de véhicule électrique 1899.....	26
Figure II.4. Exemple de véhicule électrique d'aujourd'hui.....	27
Figure II.5. Chaîne de traction tout électrique.....	28

Figure II.6. Principe de fonctionnement de la pile à combustible.....	29
Figure II.7. Véhicule hybride série.....	30
Figure II.8. Véhicule hybride parallèle.....	30
Figure II.9. Véhicule hybride série-parallèle	31
Figure II.10. Différentes types des batteries.....	32
Figure II.11. Exemple de super condensateur.....	33
Figure II.12. Composition d'un super condensateur.....	34
Figure II.13. Installation du pack de batteries au lithium-ion à bord du Roadster de Tesla.....	35
Figure II.14. Schéma présentant le chargeur à induct	35

Chapitre III Dimensionnement et modélisation

Figure III.1. Schéma de principe du système de recharge.....	39
Figure III.2. Configuration du système hybride autonome.....	40
Figure III.8. Modèle d'un pack de supercondensateurs.....	45
Figure III.9. Schéma du convertisseur Boost lié aux panneaux PV	47
Figure III.10. Schéma du convertisseur Boost lié aux au de batteries lithiumion	48
Figure III.11. Schéma du convertisseur Boost lié aux au de supercondensateurs	48
Figure III.12. Circuit équivalent d'une cellule photovolta.....	49
Figure III.13. Présente les caractéristiques $I_{pv} = f(V_{pv})$ des modules PV AEG-40 dans les conditions standards.....	51
Figure III.14. Présente les caractéristiques $P_{pv} = f(V_{pv})$ des modules PV AEG-40 dans les conditions standards.....	51
Figure III.15. Modèle R-C série d'une batterie lithium-ion [34].....	52
Figure III.16. (a) : Courant constant de décharge/charge.....	54
(b) : Réponses en tension et en état de charge du stack de batteries.....	54
Figure III.17. Modèle d'un élément super condensateur.....	54
Figure III.18. Circuit équivalent du module de super condensateurs.....	55

Figure III.19. (a) : Courant constant de décharge/charge.....56
(b) : Réponses en tension et en état de charge du stack de super condensateurs....56

Liste de Tableau

Chapitre II :Les véhicules électriques

Tableau II.1. Tableau comparatif des technologies des batteries.....32

Chapitre III : Dimensionnement et modélisation

Tableau III.1. Caractéristiques du panneau PV AEG-40 [27].....42

Tableau III.2. Caractéristiques de la source PV.....42

Tableau III.3. Caractéristiques de la batterie GS YUASA LIM30H [28].....43

Tableau III.4. Caractéristiques du pack de batteries au lithium-ion.....44

Tableau III.6. Caractéristiques du pack de supercondensateurs.....46

Introduction générale

Introduction générale

En effet, nous sommes conscients de l'importance de l'énergie dans tout, en particulier dans le développement technologique et scientifique, et de la difficulté apparente de la convertir pour en bénéficier dans des zones isolées, en termes de coût, de matériaux traditionnels utilisés dans les transports, ainsi que de la quantité de carburant utilisée par l'utilisateur, et cela confirme notre besoin de nous comme moyen et autre source de production d'énergie dans les zones isolées.

Nous notons également les dangers de l'énergie conventionnelle pour l'environnement en termes de présentation de la couche d'ozone et l'épuisement massif de cette énergie, comme les combustibles fossiles, le gaz naturel et le charbon, nous amène à penser à l'autre source d'énergie, comme que l'énergie solaire, éolienne ou hydraulique.

Les impacts environnementaux liés à l'utilisation de véhicules à motorisations thermiques sont de plus en plus nombreux et nocifs pour la planète. En parallèle à cela, les progrès technologiques ne cessent de se développer, avec l'arrivée des nouveaux dispositifs d'électronique de puissance et de matériaux de stockage de l'énergie. Ces multiples aspects favorisent la transition vers le véhicule électrique qui permet de se déplacer de manière plus écologique. Néanmoins, il reste encore un travail important pour maîtriser la globalité de l'application du véhicule électrique.

Par ailleurs, afin d'exploiter au mieux les possibilités du véhicule et de réduire encore plus avant la consommation de carburant, la possibilité de recharger le véhicule pendant les phases d'arrêt (fin de journée ou livraison) est un vrai plus. En outre, si les véhicules rechargeables (électriques ou hybrides) ne sont à ce jour que des « consommateurs » d'énergie électrique, de nombreuses études sont menées afin d'utiliser au mieux ses capacités, que ce soit pour du « simple » lissage de consommation dans le cadre d'une flotte de véhicule jusqu'à une participation active au soutien du réseau électrique. Pour offrir un meilleur accès au réseau de distribution, le véhicule doit toutefois être capable de s'adapter aux sources disponibles (triphases et monophasées). Le principal objectif de cette étude sera de proposer un convertisseur de puissance pouvant s'intégrer dans ce contexte environnemental.

Il est également nécessaire d'utiliser des dispositifs de stockage dans le véhicule électrique. En effet, l'hybridation de dispositifs électrochimiques consiste à combiner deux ou plusieurs dispositifs (contenant au moins un dispositif de stockage) afin qu'ils cumulent les

avantages de chacun compte tenu de leur cahier des charges. Ces sources hybrides combinent donc en principe les avantages spécifiques de la très haute énergie et de la haute énergie disponible sur de longues durées. Ils permettent également de séparer le volume en résistance intermédiaire et transitoire.

Par rapport aux autres dispositifs électrochimiques comme la batterie ou le condensateur classique, un supercondensateur peut être un bon choix comme source auxiliaire (source de puissance instantanée) grâce à leur puissance spécifique élevée. Leur densité inférieure à celle des batteries avec un facteur moyen de dix est compatible avec une large gamme d'applications qui a besoin de hautes puissances instantanées pendant de courtes périodes de temps. Dans ce mémoire, nous choisirons cet élément de stockage en vue d'une hybridation avec un pack de batteries au lithium-ion. Ces deux éléments doivent être rechargés régulièrement afin d'assurer la traction du véhicule.

Le véhicule électrique étant un système physique complexe composé de plusieurs sous-systèmes. La modélisation de chaque sous-système est une tâche difficile qui nécessite des études cinématiques et dynamiques approfondies du véhicule. Le véhicule électrique n'est autre qu'un réseau. Plus important encore, un réseau de recharge électrique efficace sera la véritable innovation qui permettra ou non le succès du véhicule. Au parking ou au garage de la maison, le temps de recharge principal sera la nuit pour être plein le matin, ce qui devrait représenter environ 80 % des cas .

Aussi, l'étude du contrôle d'un véhicule en s'intéressant à plusieurs phénomènes contrôlant son comportement est un problème complexe du fait de la non-linéarité, des turbulences difficilement mesurables et des incertitudes sur les informations de ce système. Ces dernières années, de nombreuses technologies de contrôle de la sécurité ont été développées et améliorées en augmentant la stabilité du véhicule en cas d'accélération longitudinale ou latérale.

Ce mémoire présente ainsi le dimensionnement et la modélisation d'un système de recharge hybride utilisant l'énergie photovoltaïque, permettant à un véhicule électrique d'architecture série, de se recharger dès qu'il se parque au garage de la maison ; et propose une stratégie de contrôle basée sur la platitude des systèmes dont l'application est sur la source hybride composée d'un pack de batteries considéré en tant que source d'énergie et d'un pack de supercondensateurs considéré comme source de puissance.

Ainsi, dans notre thèse, deux solutions techniques seront proposées. Dans un premier temps, nous présenterons une structure d'adaptateur qui assure la fonctionnalité d'un chargeur de batterie embarqué. Ce dernier est capable de gérer les différents flux d'énergie entre le réseau et la batterie, tout en maintenant l'alimentation des réseaux auxiliaires situés à l'intérieur du véhicule.

Dans le premier chapitre, nous rappellerons le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque et présenterons les différents facteurs pouvant affecter son fonctionnement. Du fait du caractère non linéaire de la caractéristique des panneaux photovoltaïques, nous signalerons la problématique du transfert du maximum de puissance afin de mettre en évidence des dispositifs MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui permettent aux panneaux de fonctionner dans des conditions optimales et ainsi d'extraire le maximum de puissance. Une étude détaillée des batteries au plomb permettra à travers les contraintes de stockage d'énergie dans ce type d'accumulateurs de démontrer comment les traiter au mieux afin d'augmenter leur durée de vie.

Dans le chapitre deux, nous présenterons les véhicules électriques ainsi que leurs principales configurations. Une étude sera consacrée aux différentes sources de stockage. Montrer les avantages des supercondensateurs permettra de démontrer l'intérêt de leur connexion afin de créer une source hybride. Enfin, différentes topologies de charge et sources de stockage seront introduites.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons la conception et la mise en oeuvre d'un système de recharge hybride. Les modèles des différents composants du système seront présentés en détail. Différentes conditions d'éclairement de montrer les performances du système et sa capacité à recharger les sources d'énergie embarquées à bord du véhicule même dans des conditions climatiques rigoureuses.

Enfin, après tout ce long travail, nous terminons ce manuscrit par une conclusion générale et des avis sur ce travail.

Chapitre I

Généralités sur l'énergie photovoltaïque

I.1. Introduction

Le solaire photovoltaïque reste, par nature, une source intermittente. Sa mise en œuvre implique donc, en parallèle, un complément d'approvisionnement en électricité produite durant les périodes ensoleillées. C'est pourquoi il faudra penser à disposer de systèmes autonomes avec stockage d'électricité intégré. Il s'agira le plus souvent de stockage électrochimique sous forme de batteries d'accumulateurs.

Dans ce chapitre, une étude sur la production d'énergie solaire photovoltaïque sera détaillée, où nous exposons tout d'abord le fonctionnement des générateurs photovoltaïques (GPV). Nous rappelons ainsi, ses principales propriétés et caractéristiques courant-tension spécifiques, non-linéaires et présentant des points de puissance maximale dépendant du niveau d'éclairement et de la température des cellules. Ensuite,. Enfin, nous présentons les systèmes d'approvisionnement à savoir le stockage électrochimique à l'aide de batteries d'accumulateurs, d'où Il s'agit de répondre aux questions suivantes : Quel type de batteries faut-il choisir ? Comment fonctionnent-elles ? Comment les traiter au mieux pour une meilleure rentabilité voire performance ? [1].

I.2. Production de l'énergie électrique photovoltaïque

I.2.1. Le rayonnement solaire

Le soleil tire son énergie de réactions thermonucléaires se produisant dans son noyau. L'énergie émise par le soleil est sous forme d'ondes électromagnétiques dont l'ensemble forme le rayonnement solaire.

En traversant l'atmosphère, le rayonnement va subir des transformations par absorption et par diffusion, on distingue pour cela [2].

I.2.1.1. Le rayonnement direct

Les rayons du soleil atteignent le sol sans subir de la modification (sans diffusion par l'atmosphère). Les rayons restent parallèles entre eux [2].

I.2.1.2. Le rayonnement diffus

Traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire rencontre des obstacles tels que les nuages, la poussière, etc. Ces obstacles ont pour effet de repartir un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux dans toutes les directions [2].

I.2.1.3. Le rayonnement réfléchi

C'est le résultat de la réflexion des rayons lumineux sur une surface réfléchissante par exemple la neige ; cette réflexion dépend de l'albédo (pouvoir réfléchissant) de la surface concernée. Le rayonnement global est tout simplement la somme de ces diverses contributions comme le montre [2].

I.2.2. La cellule photovoltaïque

I.2.2.1. Généralités

La cellule PV réalise la conversion directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique est appelée effet photovoltaïque qui est faite au niveau de la cellule photovoltaïque.

Une cellule photovoltaïque, appelée aussi photopile puisque elle génère un courant électrique continu à ses bornes, sous une tension électrique qui varie entre 0.4 volt à 0.6 volt et une puissance de 2 watt à 5 watt avec deux surfaces standard 156*156 mm² et 125*125 mm², cette dernière présente l'élément de base d'un système photovoltaïque.

Jusqu'à présent, le silicium est le matériau le plus utilisé pour la fabrication des cellules photovoltaïques, Il est classé parmi les éléments les plus abondants sur notre planète, il représente 28 % de la croûte terrestre. Il est non toxique, n'est pas présent à l'état pur mais sous forme de sable siliceux. Notamment pour le terrestre reste le silicium (Si) (98% des modules photovoltaïques fabriqués à base des cellules Si), sous formes cristallin, multi cristallin, amorphe et en couche mince [2].

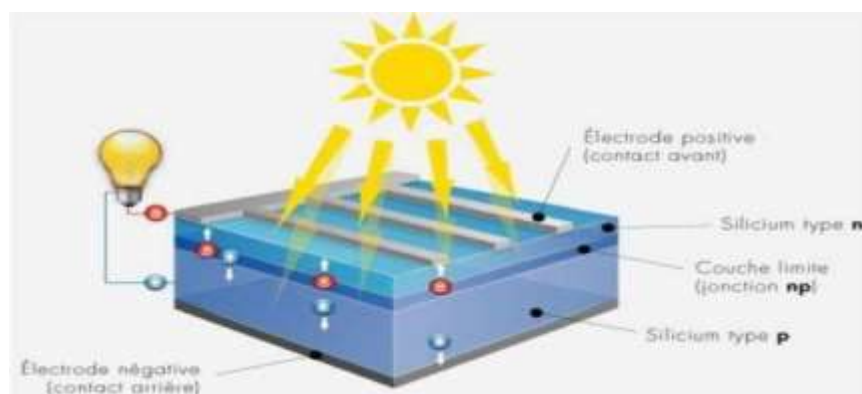


Figure I.1. La cellule photovoltaïque

I.2.2.2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules photovoltaïque permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau 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. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction PN a été formée.

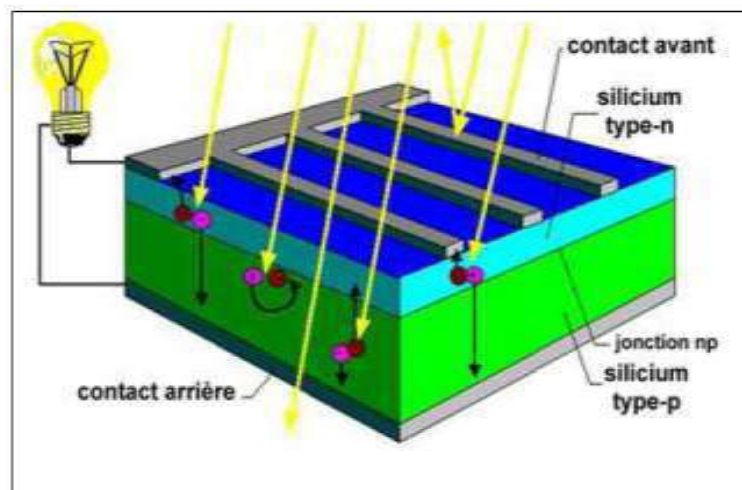


Figure I.2. Principe d'une jonction PN

Lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont bombardés par les photons constituant la lumière ; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être " arrachés / décrochés ". Les électrons " décrochés " créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque. La figure I.3 résume les étapes de production de l'électricité par une cellule photovoltaïque [2].

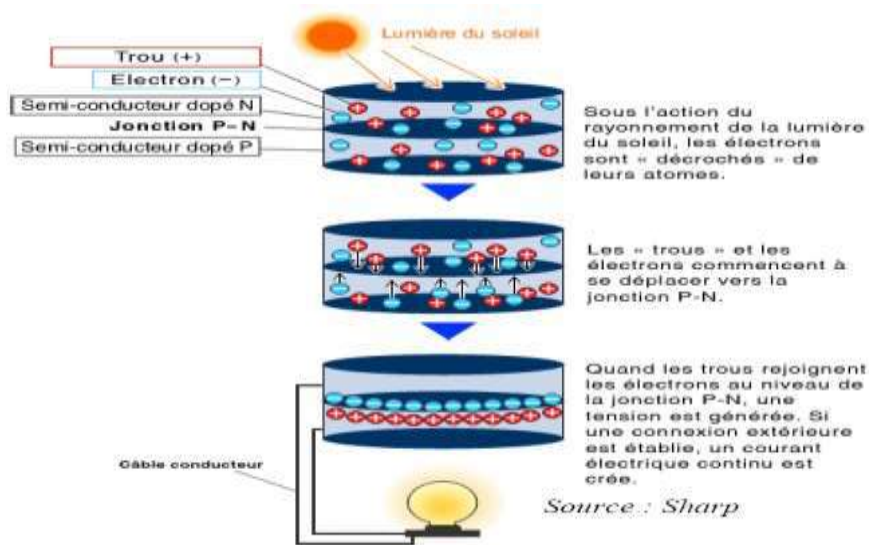


Figure I.3. Etapes de production d'électricité par une cellule photovoltaïque

I.2.2.3. Différentes technologies des cellules photovoltaïques

Trois technologies principales de cellules photovoltaïques existent :

a) Les cellules mono-cristallines

Les cellules photovoltaïques en silicium monocristallin sont formées d'un seul cristal. Elles sont en général d'un bleu uniforme [3].



Figure I.4. Cellule monocristalline

Avantages

- ✓ Elles permettent d'obtenir des rendements élevés (rendement entre 13 à 17%).

Inconvénients

- ✓ Leur coût est très élevé.
- ✓ Rendement faible sous un faible éclairage [3].

b) Les cellules poly-cristallines

Elles sont constituées de plusieurs cristaux. La cellule a un aspect bleuté mosaïque (pas uniforme). Leur rendement est de 11 à 15%.

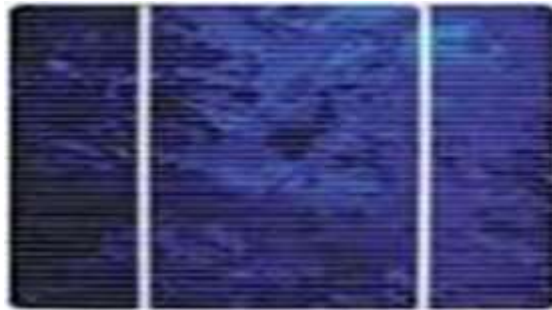


Figure I.5. Cellules photovoltaïques poly-cristallines

Avantages

- ✓ Un bon rendement, mais cependant moins bon que pour les cellules monocristallines.
- ✓ Elles offrent actuellement un bon rapport qualité/prix.

Inconvénients

- ✓ Rendement faible sous un faible éclairage [3].

c) Les cellules amorphes

Le silicium est utilisé en couche mince, il n'est pas cristallisé. Il est déposé sur une plaque de verre. Ce type de cellule on le trouve le plus souvent dans les petits produits de consommation (montre, calculatrice) [3].



Figure I.6. Cellule amorphe

Avantages

- ✓ Moins cher que les autres.
- ✓ Fonctionnement avec un éclairage faible.

Inconvénients

- ✓ Rendement faible.
- ✓ Performances qui diminuent avec le temps, durée de vie courte [3].

I.2.2.4. Modélisation d'une cellule photovoltaïque

Le modèle mathématique associé à une cellule se déduit à partir de celui d'une jonction PN. On y ajoute le courant I_{ph} , proportionnel à l'éclairement, ainsi qu'un terme modélisant les phénomènes internes. Le courant I issu de la cellule s'écrit alors [4].

$$I = I_{ph} - I_{od} \left(e^{\frac{q(V+R_s I)}{KT}} - 1 \right) - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \tag{I.1}$$

Où :

I_{ph} : photo courant, ou courant généré par l'éclairement [A]

I_{od} : courant de saturation de la diode [A]

R_s : résistance série [Ω]

R_{sh} : résistance shunt [Ω]

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

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

T : température de la cellule [K]

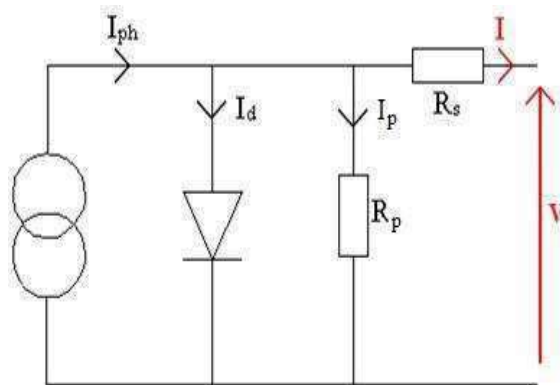


Figure I.7. Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque

La diode modélise le comportement de la cellule dans l'obscurité. Le générateur de courant modélise le courant I_{ph} généré par un éclairement. Enfin, les deux résistances modélisent les pertes internes.

- Résistance série R_s : modélise les pertes ohmiques du matériau.
- Résistance shunt R_{sh} : modélise les courants parasites qui traversent la cellule.

Idéalement, on peut négliger $R_s \cdot I$ devant V , puis travailler avec un modèle simplifié

$$I = I_{ph} - I_{od} \left(e^{\frac{q(V+R_s I)}{KT}} - 1 \right) - \frac{V}{R_{sh}} \tag{I.2}$$

$$I = I_{ph} = (E/E_0) I_{sc0} \tag{I.3}$$

Où $V_t = \frac{KT}{q}$ représente le potentiel thermique (25 mV à 25 C°).

I.2.2.5. Caractéristique courant - tension d'une cellule photovoltaïque

Dans l'obscurité, la cellule photovoltaïque se comporte comme une jonction PN (diode). Dans ces conditions, on retrouve pour une cellule la caractéristique courant - tension d'une jonction PN. Soumis à un rayonnement lumineux, la cellule produit un courant Photoélectrique. Ce courant déplace la caractéristique «diode» de la cellule solaire vers le haut, dans la direction positive; l'amplitude du déplacement est égale au courant photoélectrique. Donc, quand la cellule est illuminée, elle produit un courant d'autant plus élevé que l'éclairement est intense. Ce courant est proportionnel à l'éclairement.

On retrouve donc la même caractéristique de la diode, mais décalée vers le haut d'un courant I_{ph} (photo courant) correspondant à l'intensité de l'éclairement. La figure I.8 schématise la caractéristique non linéaire $I(V)$ d'une cellule PV pour un éclairement et une température donnés, avec la présence d'un Point de Puissance Maximale (PPM) caractérisé par sa tension et son courant optimaux notés respectivement V_{OPT} et I_{OPT} .

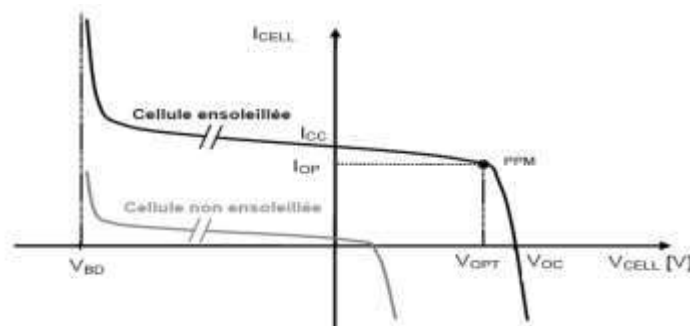


Figure I.8. Caractéristique I-V le panneau est une source du courant ou source de tensio

*** Le facteur de forme**

Le facteur de forme qui indique le degré d'idéalité de la caractéristique, soit le rapport

$$FF = \frac{PPM}{V_{oc}.I_{cc}} \times 100\% \tag{I.3}$$

*** Le rendement**

On définit le rendement énergétique d'une cellule par le rapport entre la puissance maximum et la puissance incidente

$$\eta = \frac{PPM}{G.S} \tag{I.4}$$

Avec :

G : éclairement [W/m²]

S : surface active de la cellule [m²]

PPM est la puissance maximale mesurée dans les conditions STC (Standard Test Conditions)

C'est-à-dire sous un spectre AM 1.5, une température de 25 C° et un éclairement de 1000 W/m².

I.2.3. Le générateur photovoltaïque

I.2.3.1. Regroupement en série

Une association de (Ns) cellule en série figure (II.9) permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenues par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation résume les caractéristique électriques d'une association série de (Ns) cellules [5].

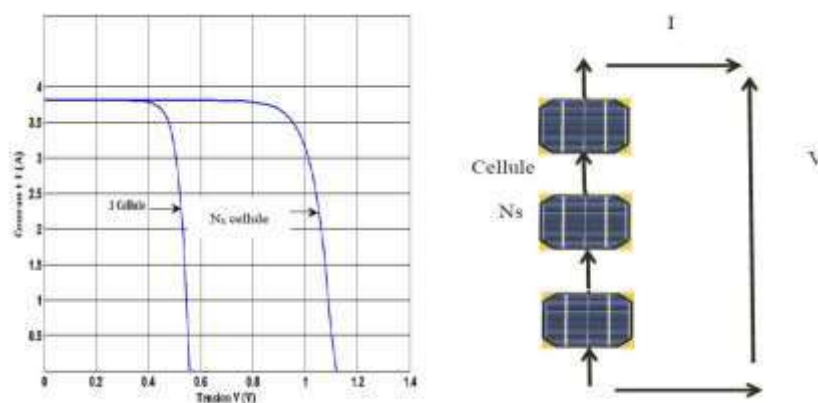


Figure I.9. Caractéristique courant-tension pour Ns cellule en série

I.2.3.2. Regroupement en parallèle

Une association parallèle de (N_p) cellule figure (II.10) est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants [6].

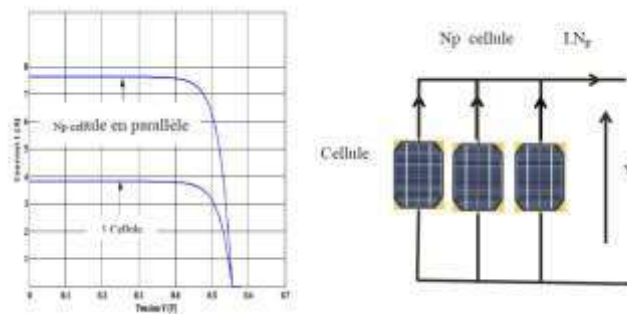


Figure I.10. Caractéristique courant-tension pour N_p cellules en parallèle

I.2.3.3. Regroupement mixte

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

Pour produire davantage de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module photovoltaïque complet (générateur d'énergie). Ainsi, la connexion en série de cellules identiques permet d'augmenter la tension de l'ensemble (figure I.11), tandis que la mise en parallèle permet d'accroître le courant. Le câblage série/parallèle est possible et souvent utilisé pour obtenir globalement un générateur PV aux caractéristiques souhaitées afin d'adapter théoriquement la production d'énergie photovoltaïque à la demande [7].

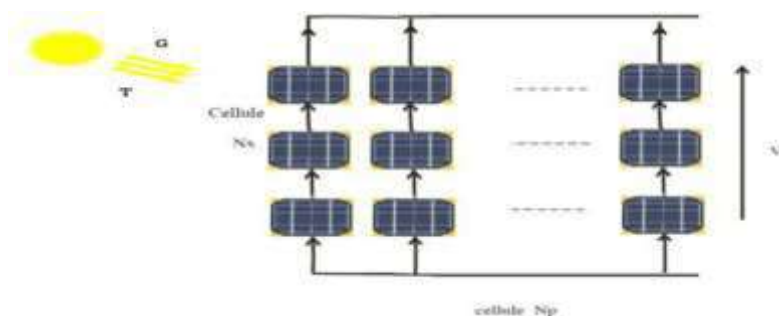


Figure I.11. Groupement de N_s et N_p modules en série et en parallèle

I.2.4. Influence de la température et Influence de l'éclairement

I.2.4.1. Influence de la température

Nous présentons ci-dessous les caractéristiques I-V et P-V (figures I.12 et I.13) d'un module photovoltaïque SP75 pour un niveau d'ensoleillement G donné et pour différentes températures.

D'après la figure (I.12) nous remarquons que le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement avec l'augmentation de température, on constate que la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Et par contre la puissance maximale du générateur subit une diminution lorsque la température augmente figure (I.13).

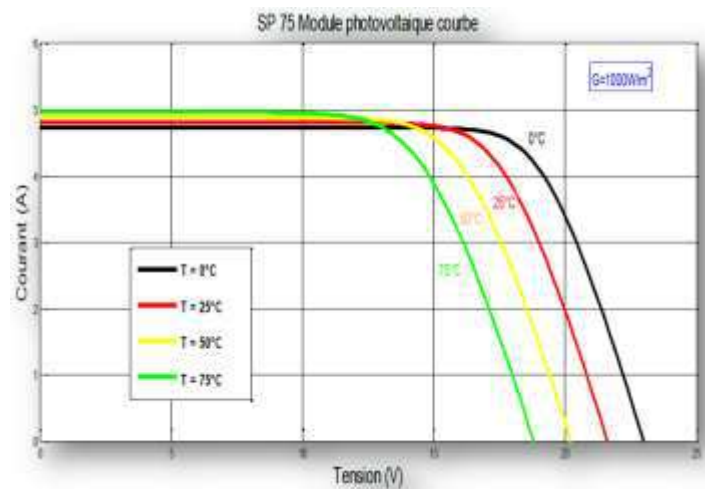


Figure I.12. Caractéristiques I-V en fonction de la température

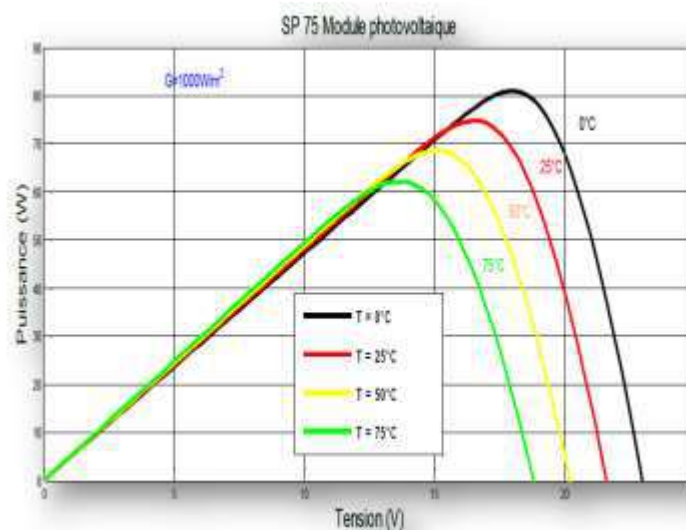


Figure I.13. Caractéristiques $P=f(V)$ en fonction de la température

I.2.4.2. Influence de l'éclairement

Dans cette partie, nous avons fixé la température pour différents éclairements, pour la figure (I.14), on remarque que pour l'éclairement $G=1000\text{W/m}^2$ le courant $I_{cc} = 4.8\text{A}$ et pour $G=800\text{W/m}^2$ le courant $I_{cc} = 3.84\text{A}$ on peut voir que le courant subit une variation importante quand l'éclairement augmente le courant de court-circuit est augmenté, mais par contre la tension varie légèrement. Ce qui se traduit par une augmentation de la puissance, lorsque l'éclairement est augmenté figure (I.15).

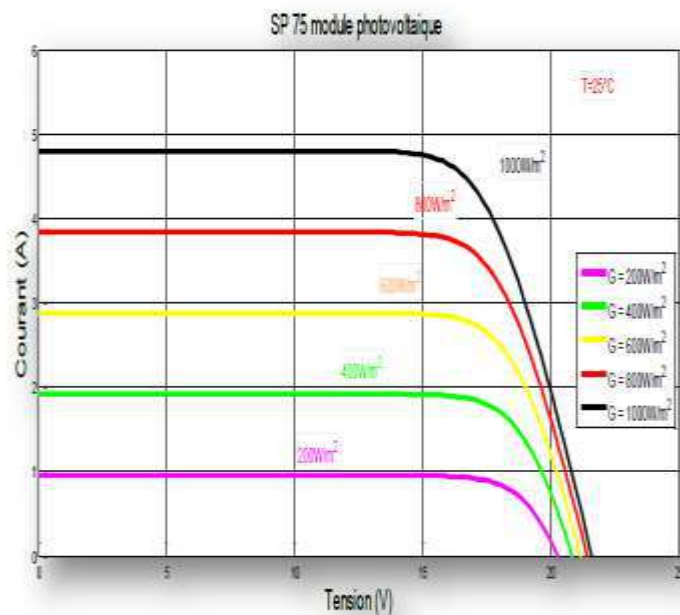


Figure I.14. Caractéristiques $I=f(V)$ en fonction de l'éclairement

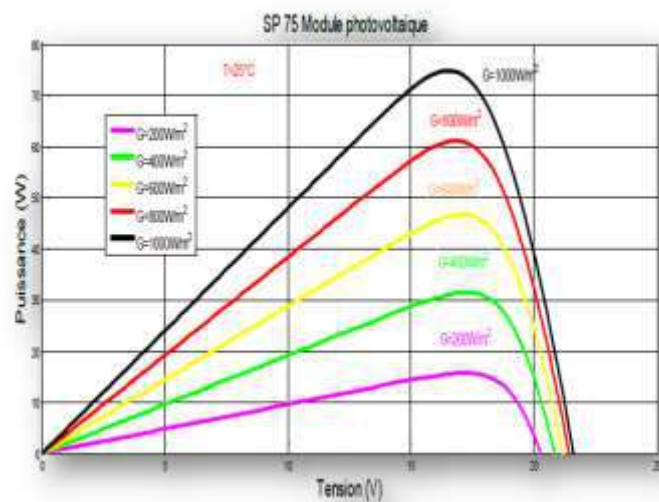


Figure I.15. Caractéristiques $P=f(V)$ en fonction de l'éclairement

I.2.4.3. Caractéristiques nominales d'un générateur photovoltaïque

Le fabricant accompagne son module :

- D'une fiche rendant compte des contrôles auxquels il a été soumis
- D'une fiche indiquant les caractéristiques du module notamment :
 - Les caractéristiques physiques du module (poids, dimensions, surface, points de fixation...).
 - Les courbes caractéristiques courant en fonction de la tension, dans les conditions de fonctionnement standard (STC).
 - Quelques caractéristiques électriques.

Les caractéristiques électriques sont :

- La tension de circuit ouvert : mesurée aux bornes de la cellule PV aux conditions de fonctionnement standard, V_{OC} [V].
- L'intensité de court-circuit : mesurée aux bornes de la cellule PV aux conditions de fonctionnement standard, I_{CC} [A].
- La puissance nominale, appelée puissance crête : puissance maximale mesurée aux bornes de la cellule PV aux conditions de fonctionnement standard (STC), P_{max} [W] ou [Wc].
- La tension de puissance nominale : tension correspondant au point de puissance maximale aux conditions de fonctionnement standard, V_{OPT} [V].
- L'intensité de puissance nominale: intensité correspondant au point de puissance maximale aux conditions de fonctionnement standard (STC), I_{OPT} [A] [1].

I.2.4.4. Recherche du point de puissance maximum

Le MPPT est un système toute la convertesure et qui permet de câler le courant et la tension d'entrée de l'onduleur sur le point de puissance maximale du groupe photovoltaïque. Le groupe photovoltaïque relié à l'onduleur présente une infinité de point de fonctionnement possible, c'est-à-dire une infinité de couple courant-tension ($U ; I$). Mais il existe un seul point ($U ; I$) de tel sorte que la puissance délivrée ($P=U \times I$) par le groupe photovoltaïque soit maximum. Ce point est le point de puissance maximum (MPP, Maximum Power Point en anglais) du groupe photovoltaïque. Il va de soi que la puissance délivrée par le groupe photovoltaïque doit être la plus importante possible, c'est-à-dire la puissance correspondant au point de puissance maximum, notée PMPP. Les onduleurs photovoltaïques disposent d'un système permettant de trouver ce point de puissance maximum. Ce système s'appelle le MPPT (Maximal Power Point Tracker). Concrètement, il s'agit d'une unité d'électronique de puissance

placée en amont du convertisseur continu → alternatif. Certains onduleurs sont munis d'un seul tracker, d'autres en sont doter de plusieurs [8].

I.2.5. Différents types de systèmes photovoltaïques

On rencontre généralement trois types de systèmes photovoltaïques, les systèmes autonomes, les systèmes hybrides et les systèmes connectés à un réseau. Les deux premiers sont indépendants du système de distribution d'électricité, en les retrouvant souvent dans les régions éloignées.

I.2.5.1. Les systèmes autonomes

Ces systèmes photovoltaïques sont installés pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergie généralement, ces utilisés systèmes sont dans les régions isolées et éloignées du réseau. Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes ont les possibilités de couplage direct à une charge adaptée ou couplage avec adaptateur d'impédance MPPT (Maximum Power Point Tracking), fonctionnement au fil du soleil ou avec stockage d'énergie électrique.

Le couplage direct implique un fonctionnement au fil du soleil, donc à puissance essentiellement variable au cours de la journée. Les charges typiques à courant continu qui peuvent satisfaire le critère (tension constante à puissance variable) sont les accumulateurs électrochimiques. Les charges alternatives sont les pompes à eau, c'est le pompage au fil du soleil, le stockage est néanmoins présent sous la forme d'eau emmagasinée (dans un réservoir). Dans la plus part des cas une adaptation d'impédance doit être réalisée en insérant entre le générateur et sa charge électrique un dispositif électronique qui permet de forcer le système à fonctionner à sa puissance maximale [9].



Figure I.16. Système autonome

I.2.5.2. Les systèmes hybrides

Les systèmes d'énergie hybride associent au moins deux sources d'énergie renouvelable aussi une ou plusieurs sources d'énergie classiques. Les sources d'énergie renouvelable, comme le photovoltaïque et l'éolienne ne délivrent pas une puissance constante, mais vu leurs complémentarités, leur association permet d'obtenir une production électrique continue. Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées.

Les différentes sources dans un système hybride peuvent être connectées en deux configurations, architecture à bus continu et architecture à bus alternatif. Dans la première configuration, la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus continu. Ainsi, les systèmes de conversion d'énergie à courant alternatif (A_C) fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être convertie ensuite en courant continu (C_C). Les générateurs sont connectés en série avec l'onduleur pour alimenter les charges alternatives. L'onduleur doit alimenter les charges alternatives à partir du bus continu et doit suivre la consigne fixée pour l'amplitude et la fréquence. La fonction spécifique du système de supervision est la commande de mise en marche et arrêt des générateurs et du système de stockage. L'avantage de cette topologie est la simplicité de commande. Dans la seconde configuration tous les composants du système hybride sont reliés à la charge alternative [10].

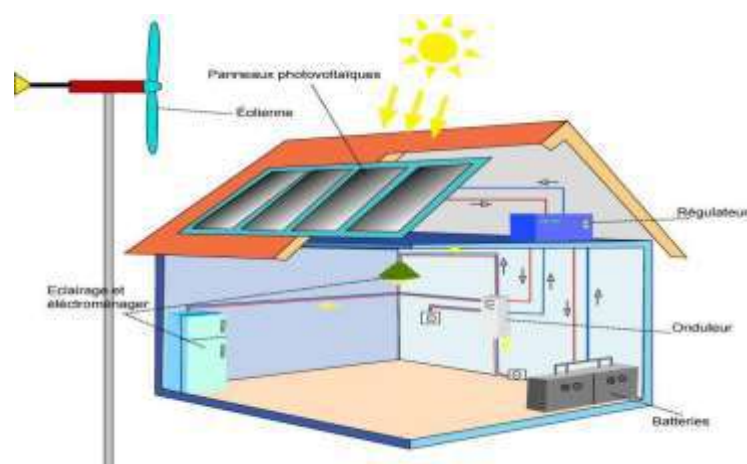


Figure I.17. système hybride (photovoltaïque et éolienne)

I.2.5.3. Système connecté au réseau

Les systèmes de production d'énergie photovoltaïque connectée à un réseau sont une résultante de la tendance à la décentralisation du réseau électrique. L'énergie est produite plus près des lieux de l'énergie est produite plus près des lieux de consommation. Les systèmes connectés à un réseau réduisent la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution. Il produit sa propre électricité et achemine son excédent d'énergie vers le réseau, auprès duquel il s'approvisionne au besoin, ces transferts éliminent le besoin d'acheter et d'entretenir une batterie. Il est toujours possible d'utiliser ces systèmes pour servir d'alimentation d'appoint lorsque survient une panne de réseau.



Figure I.18. Système connecté au réseau

I.3. Stockage de l'énergie électrique photovoltaïque

I.3.1. Accumulateurs, piles et batteries : des performances en constante amélioration

Les accumulateurs et les piles sont des systèmes électrochimiques servant à stocker de l'énergie. Ceux-ci restituent sous forme d'énergie électrique, exprimée en watt-heure [Wh] l'énergie chimique générée par des réactions électrochimiques. Ces réactions sont activées au sein d'une cellule élémentaire entre deux électrodes baignant dans un électrolyte lorsqu'une charge, un moteur électrique par exemple, est branché à ses bornes. L'accumulateur est basé sur un système électrochimique réversible. Il est rechargeable par opposition à une pile qui ne l'est pas. Le terme batterie est alors utilisé pour caractériser un assemblage de cellules élémentaires (en général rechargeables).

Un accumulateur, quelle que soit la technologie utilisée, est pour l'essentiel défini par

trois grandeurs. Sa densité d'énergie massique (ou volumique), en watt-heure par kilogramme, Wh/kg (ou en watt-heure par litre, Wh/l), correspond à la quantité d'énergie stockée par unité de masse (ou de volume) d'accumulateur. Sa densité de puissance massique, en watt par kilogramme [W/kg], représente la puissance (énergie électrique fournie par unité de temps) que peut délivrer l'unité de masse d'accumulateur. Son nombre de cycles charge/décharge, caractérise la durée de vie de l'accumulateur. Jusqu'à la fin des années quatre-vingt, les deux principales technologies répandues sur le marché étaient les accumulateurs au plomb (pour le démarrage de véhicules, l'alimentation de secours de centraux téléphoniques, etc) et les accumulateurs nickel-cadmium (outillage portable, jouets, éclairage de secours, etc).

La technologie au plomb, connue plus communément sous le nom de batterie au plomb, est également qualifiée de système au plomb-acide. En effet, les réactions chimiques mises en jeu impliquent l'oxyde de plomb constituant l'électrode positive (improprement appelée cathode) et le plomb de l'électrode négative (anode), toutes deux plongées dans une solution d'acide sulfurique qui constitue l'électrolyte. Ces réactions tendent à convertir le plomb et l'oxyde de plomb en sulfate de plomb, avec formation d'eau. Pour recharger la batterie, ces réactions doivent être inversées par la circulation d'un courant électrique imposé. Les inconvénients relevés sur la technologie au plomb (poids, fragilité, utilisation d'un liquide corrosif) ont conduit au développement d'accumulateurs alcalins, de plus grande capacité (quantité d'électricité restituée à la décharge) mais développant une force électromotrice moindre (différence de potentiel aux bornes du système en circuit ouvert). Leurs électrodes sont soit à base de nickel et de cadmium (accumulateur nickel-cadmium), soit à base d'oxyde de nickel et de zinc (accumulateur zinc-nickel), soit à base d'oxyde d'argent couplé à du zinc, du cadmium ou du fer (accumulateurs à l'oxyde d'argent).

Toutes ces technologies utilisent une solution de potasse comme électrolyte. Les technologies au plomb, comme les accumulateurs alcalins, se caractérisent par une grande fiabilité, mais leurs densités d'énergie massiques restent relativement faibles (30 Wh/kg pour le plomb, 50 Wh/kg pour le nickel cadmium) [11].

I.3.2. Les batteries au plomb

Pour un usage autonome, le photovoltaïque comme pour toute autre énergie intermittente, nécessite un système de stockage électrique permettant de la restituer, afin de satisfaire la demande de l'utilisateur. Les batteries au plomb, en raison de leur faible coût et de leur simplicité de mise en oeuvre, sont pour l'instant les plus utilisées [12].

I.3.2.1. Constitution d'une batterie au plomb

Un accumulateur de 2 V est l'unité de base d'une batterie au plomb. Il se compose notamment d'électrodes positives et négatives, d'un séparateur microporeux et d'un électrolyte.

Un élément de batterie de démarrage (technologie "plomb ouvert") comprend des plaques planes positives (2) et négatives (1) assemblées en alternance. Le nombre de plaques pour chaque polarité et leur surface sont des paramètres qui définissent la capacité de l'élément. Par exemple, l'électrode positive comporte ici 4 plaques en parallèle, reliées par un connecteur (4). Pour éviter les courts-circuits entre les plaques de polarité différente, un séparateur micro poreux isolant est placé entre ces plaques lors du montage (3). Les plaques positives et négatives sont assemblées en faisceaux (6) et plongées dans une solution d'acide sulfurique et d'eau distillée. Chaque faisceau constitue ainsi un élément.

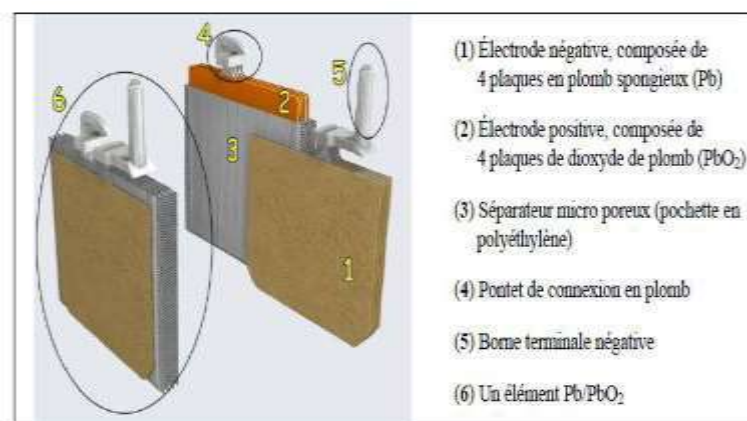


Figure I.19. Vue en coupe d'un élément au plomb ouvert (batterie de démarrage)

L'ensemble est contenu dans un bac (en polypropylène, PVC ou ABS) muni d'orifices en partie supérieure pour permettre le remplissage des éléments et les compléments en eau si nécessaire ainsi que pour l'évacuation des gaz produits. Les deux bornes en plomb raccordées aux faisceaux de plaques de chaque polarité, permettent le raccordement de la batterie au circuit extérieur.

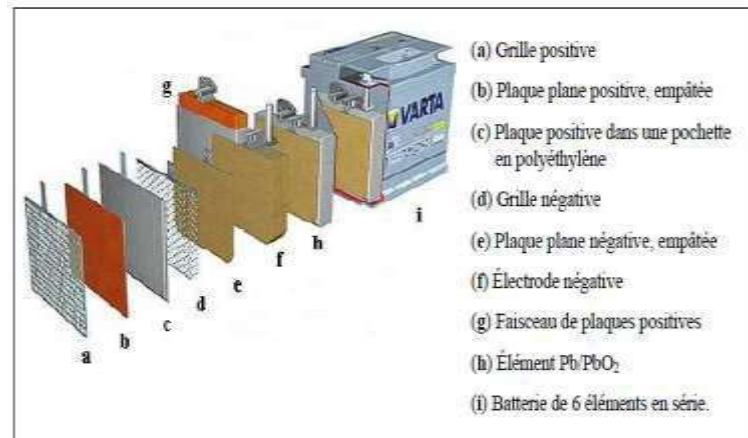


Figure I.20. Vue éclatée d'une batterie de démarrage

I.4. Conclusion

La production d'électricité dans les systèmes photovoltaïque dépend principalement de plusieurs facteurs intégrés, où l'absence de tout facteur ou de dégradation conduit à une productivité plus faible.

Au cours de ce chapitre, nous avons fait un état des lieux de la production et du stockage PV., nécessitant l'utilisation d'une phase d'adaptation associée à la commande de recherche du point de puissance maximale (MPPT). Il existe également plusieurs techniques qui nous permettent d'extraire le maximum de force.

Comme mentionné dans ce chapitre également, toutes les caractéristiques et facteurs principaux du fonctionnement de tout système photovoltaïque et les facteurs les plus importants de faible productivité sont : le rayonnement et la température au cours de l'année. L'angle du panneau solaire est un facteur influent, et il est préférable de choisir l'angle de la latitude de la zone.

Chapitre II

Les véhicules électriques

II.1. Introduction

La voiture électrique a été souvent considérée comme une technologie pleine d'avenir et qui donne des espérances pour mettre fin à cette pollution alarmante de l'atmosphère due au secteur de transport routier, capable de prendre une importante part de marché, mais qui n'y est pas arrivée. Cet échec s'explique principalement par la concurrence, disposant d'une technologie bien établie : le moteur à explosion, qui a profité des économies d'échelle, du faible coût du carburant et des subsides.

Conçues pour lutter efficacement contre la pollution, les véhicules électriques sont, malheureusement, freinés par leurs coûts élevés, leur autonomie limitée qui dépend de la capacité des batteries, le manque d'investissements et d'autres problèmes critiques qui handicapent cette invention.

L'idée du véhicule électrique n'est pas récente et pourtant sa structure interne n'est pas figée. Plusieurs solutions sont actuellement en développement. La recherche dans le domaine des batteries est importante et donne lieu à de nombreux prototypes [13].

L'objet de ce deuxième chapitre est de présenter un bref historique, quelques généralités sur les véhicules électriques, et d'étudier son fonctionnement ainsi ses différentes architectures et les éléments constituant.

II.2. Les véhicules électriques : solution ultime du problème de CO₂

Un véhicule électrique, comme un véhicule thermique, dépend d'une source ou d'une forme d'énergie pour son fonctionnement. Dans les véhicules thermiques, le carburant et le diesel sont les principales sources d'énergie à partir du pétrole qui, lorsqu'il est brûlé, émet des particules de gaz à effet de serre. Dans un véhicule électrique, la forme d'énergie utilisée, comme son nom l'indique, est l'électricité.



Figure II.1. Dodge EV

Il est important de connaître l'état actuel de la production d'électricité. Dans le monde, 39% de l'électricité est produite à partir de charbon, 20% à partir du gaz naturel, 16% à partir d'énergie hydraulique, 16% à partir de l'énergie nucléaire, 7% à partir du pétrole et 2% à partir d'énergies renouvelables comme les éoliennes et les capteurs solaires. Les émissions polluantes de ces centrales sont très nocives pour la planète et la vie des gens. En effet, « les centrales au charbon sont à l'origine de la majorité des émissions de mercure, de 86% des émissions totales de SO₂ et de 90% des émissions de NO_x ».

Une augmentation de la demande en électricité serait, sans aucun doute comblée par l'implantation de centrales au charbon, car ce dernier est un combustible peu cher et présent en grande quantité un peu partout sur la planète. Dans le cas échéant, les émissions de ces gaz toxiques augmenteraient proportionnellement en fonction de la demande en électricité [1].



Figure II.2. Centrale au charbon

II.3. Histoire des véhicules électriques

Contrairement aux idées reçues, les débuts de la voiture électrique coïncident avec ceux de l'histoire automobile, la première fut la JEANTAUD en 1894, c'était un phaéton deux places, La carriole électrique existait bien avant, la première a fait son apparition aux alentours de 1830 par un homme d'affaire écossais : Robert Anderson. Les découvertes des lois de l'induction électromagnétique par Michael Faraday en 1831 ont permis le développement des moteurs électriques [14].

Trois années plus tard, l'américain Thomas Davenport construit une petite locomotive électrique qui fut la première automobile à accumulateurs non rechargeables, cette dernière réussissait à parcourir un court trajet sur rail, Puis en 1838, Robert Davidson y ajouta quelques modifications pour arriver à un modèle similaire, qui peut rouler jusqu'à 6km/h. Ces deux inventions n'utilisaient pas de batterie rechargeable, puisque cette dernière n'était pas encore inventée, ils fonctionnaient avec des batteries non rechargeables.

La batterie rechargeable au plomb acide a été apparue plus tard, en 1859, inventée par le Français Gaston Planté et améliorée au fil du temps. Cette invention posa les bases des prochaines générations des véhicules électriques et marqua le début de leur essor.

En novembre 1881, Gustave Trouvé présenta une automobile électrique, ou plutôt un tricycle électrique, à l'exposition Internationale d'Electricité à Paris. Néanmoins, ce n'était qu'un prototype et son utilisation était plus que délicate puisque le conducteur devait, grâce à un système de poulies, immerger des plaques de métal dans des récipients contenant de l'acide afin de moduler l'intensité du courant et donc la vitesse [15].

Les voitures électriques ne cessent d'apparaître, beaucoup plus sophistiquées et pratiques, elles envahissent le marché de plus en plus, et commencent alors à se démocratiser petit à petit.

On voit sur l'image juste en bas, la photo de la première voiture électrique à pouvoir franchir les 100 kilomètres par heure : la jamais contente.



Figure II.3. Exemple de véhicule électrique 1899

Le développement du véhicule électrique devenant impératif pour répondre au problème de la pollution des villes, des études portant sur le choix de la chaîne de traction sont menées par plusieurs équipementiers électriques (LEROY SOMER, AUXILEC, ...) ainsi que par de grands groupes automobiles (NISSAN, GENERAL MOTORS, ...) afin d'améliorer les performances [13].

Aujourd'hui, Les voitures électriques sont axées sur un usage urbain. Elles sont souvent de petite taille. Elles restent cependant assez chères, par exemple Mitsubishi commercialise une voiture électrique depuis 2009 au Japon, aux performances respectables d'une vitesse de 140 km/h et une autonomie flirtant avec les 160 km d'après leurs annonces.



Figure II.4. Exemple de véhicule électrique d'aujourd'hui

II.4. Principales configurations des véhicules électriques

Couramment, on distingue le véhicule tout électrique du véhicule électrique hybride. La différence dépend de l'utilisation d'une seule source d'énergie électrochimique (les batteries), ou de l'association de plusieurs sources d'énergie différentes afin d'assurer la traction du véhicule.

II.4.1. Les véhicules tout électriques

Les véhicules électriques sont un ancien concept qui a vu le jour pour la première fois en 1834. À cette époque, le moteur électrique était un concurrent direct pour les moteurs à essence et à vapeur. À la moitié du 20^{ème} siècle les véhicules à essence ont fini par exclure les véhicules électriques de la course. Il a fallu attendre le début du siècle suivant pour repenser à l'idée d'utiliser ce type de véhicules dans le but de diminuer les effets négatifs du grand nombre de véhicules conventionnels [16].

Les véhicules autonomes tout électriques utilisent la seule énergie électrique des batteries. Cette énergie est utilisée pour alimenter un ou plusieurs moteurs électriques de traction. La chaîne de traction tout électrique comprend :

- ✓ Des batteries (en bleu).
- ✓ Un convertisseur (en violet).
- ✓ Un moteur électrique (en jaune).
- ✓ Un différentiel (en vert).
- ✓ Des roues.

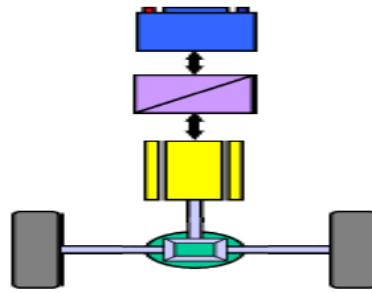


Figure II.5. Chaîne de traction tout électrique

II.4.1.1. Véhicules électriques à batteries rechargeables par prise de courant

Les véhicules électriques fonctionnant avec des batteries, constituent aujourd'hui l'essentiel du parc mondial des véhicules électriques. Une batterie est un système embarqué pouvant stocker de l'énergie électrique pour la restituer par la suite. C'est à ce jour le système le mieux adapté pour l'alimentation des véhicules électriques. Son invention remonte au 19^{ème} siècle, il est, de ce fait, le système de stockage le mieux maîtrisé techniquement [17].

II.4.1.2. Véhicules électriques à alimentation par pile à combustible

Les véhicules électriques à pile à combustible sont semblables aux autres véhicules électriques sauf qu'ils produisent leur propre électricité à bord. La source de cette électricité est la pile à combustible, un dispositif électrochimique semblable à une batterie à plusieurs égards. Plutôt que de stocker et relâcher l'énergie électrique comme une batterie, une pile à combustible produit toutefois de l'électricité par réaction chimique aussi longtemps qu'elle reste alimentée en carburant.

Il y a divers types de piles à combustible qui fonctionnent avec différents carburants mais la pile à membrane échangeuse de protons, considérée comme la plus prometteuse pour les véhicules automobiles, utilise de l'hydrogène H_2 et l'oxygène de l'air ambiant comme carburants [18].

L'application de cette technologie dans le domaine automobile est assez récente et relève encore de l'expérimentation. La pile à combustible existe depuis près de deux cents ans. Elle fut inventée en Angleterre au début du 19^{ème} siècle par deux anglais, Sir Henry Davy et Sir William Grove.

Son principe de fonctionnement (Figure II.6) repose sur la production d'énergie par réaction entre de l'hydrogène et de l'oxygène.

Cette réaction produit, en fait, de l'électricité, l'eau et de la chaleur selon l'équation suivante [19].

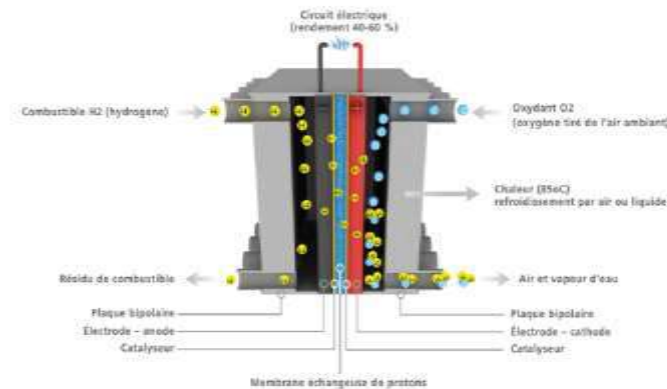
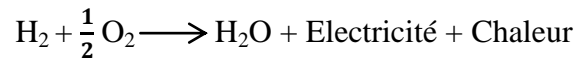


Figure II.6. Principe de fonctionnement de la pile à combustible

II.4.2. Les véhicules hybrides

Les véhicules hybrides utilisent au moins deux types de production et de stockage d'énergie habituellement un moteur thermique classique (essence ou diesel), en plus d'au moins un moteur électrique et le stockage d'électricité par batteries. Ces systèmes peuvent fonctionner simultanément ou indépendamment les uns des autres. Les véhicules hybrides sont quant à eux munis d'un moteur classique et d'un moteur électrique qui fonctionnent en combinaison selon la vitesse et l'accélération du véhicule [20].

II.4.2.1. Véhicules hybrides série

Dans ce cas, le principe repose sur le fait que l'énergie électrique utilisée par le moteur électrique peut être produite par un alternateur entraîné par un moteur thermique fonctionnant à vitesse de rotation constante. Les deux moteurs sont donc en série, d'où l'appellation. On peut alors choisir la vitesse de rotation du moteur thermique de manière à obtenir un rendement maximum et par conséquent augmenter la quantité de carburant brûlée dans un cycle moteur, ce qui implique une diminution des rejets gazeux. Par ailleurs, la signature acoustique du moteur thermique peut être améliorée pour la vitesse de rotation fixe choisie [16].

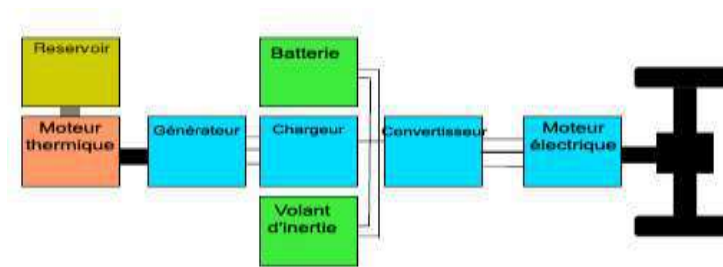


Figure II.7. Véhicule hybride série

La plus grande partie de l'énergie électrique nécessaire au fonctionnement du moteur électrique est fournie par la génératrice. La batterie est là uniquement en tampon pour fournir des pointes d'énergie ou pour fonctionner en mode tout électrique [16].

II.4.2.2. Véhicule hybride parallèle

La première idée est de faire deux véhicules en un, en bénéficiant des avantages de chacun. Le VHP possède ainsi deux moteurs fonctionnant en parallèle, un électrique et un thermique. Les deux moteurs sont utilisés séparément et on résout alors le problème écologique du moteur thermique en ville, en fonctionnant en mode électrique et celui de l'autonomie du véhicule électrique pour les grands déplacements hors des agglomérations en fonctionnant en mode thermique [16]. Le schéma de principe d'un tel véhicule est donné sur la figure II.8.

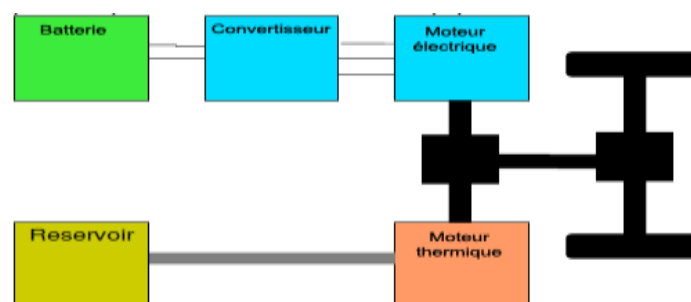


Figure II.8. Véhicule hybride parallèle

Le moteur électrique joue habituellement aussi le rôle d'un générateur entraîné par le moteur thermique pour recharger les batteries lorsque la puissance électrique n'est pas requise pour propulser le véhicule.

II.4.2.3. Véhicule hybride série-parallèle

La catégorie des architectures combinées correspond aux hybrides série/parallèle, appelée aussi hybride parallèle à dérivation de puissance, cette architecture intègre un moteur électrique, une génératrice, et un moteur thermique. Grâce à une gestion efficace des puissances

demandées d'un côté, et fournies de l'autre, il est possible de contrôler en régime le moteur thermique, et de partager son couple entre les demandes du véhicule, et la recharge de la batterie. Schématise le fonctionnement d'un hybride série-parallèle [21].

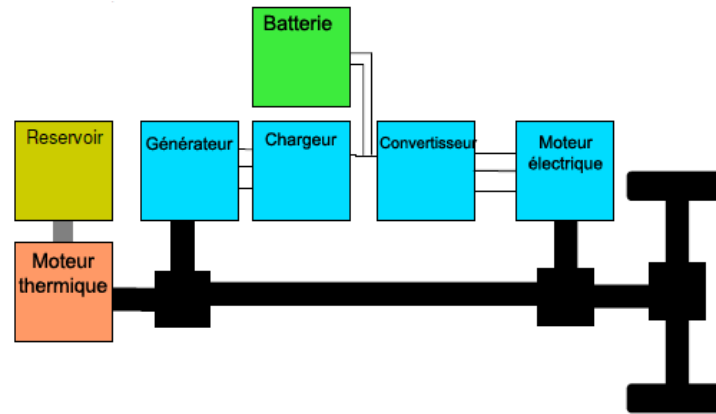


Figure II.9. Véhicule hybride série-parallèle

II.5. Les sources d'énergie électrique

II.5.1. La batterie

La batterie est le point de stockage de l'électricité. Il est relié au moteur électrique via un régulateur et un transformateur. La batterie est chargée à partir d'une source externe pendant les pauses, le problème des batteries est leur courte durée de vie et le long temps de charge. Il peut s'agir de plomb, de Ni-Cd, de Ni-Mh ou de lithium.



Figure II.10. Différents types des batteries

- **Les batteries au plomb** : elles représentent la technologie la plus ancienne, sont les plus populaires, les moins chères et sont recyclables à 97 %. Ils ont été utilisés au début des voitures électriques, et aujourd'hui ils sont largement ignorés.
- **Les batteries au nickel-cadmium (Ni-Cd)** : largement utilisées au XXe siècle, souffrent en partie des mêmes problèmes que celles au plomb en termes de performances. La toxicité du cadmium contenu dans ces batteries fait que leur usage est très encadré et que leur application risque d'être limitée [22].
- **Les batteries au nickel-hydrure métallique (Ni-MH)** : sont largement utilisées à l'heure actuelle dans les VEH, et sont réputées avoir une longue durée de vie et une meilleure densité énergétique que les deux premières. Pour autant leurs performances restent encore trop faibles pour être le seul conteneur d'énergie d'une voiture [22].
- **Les batteries au lithium** : Les batteries lithium-ion offrent des performances supplémentaires et paient un prix plus élevé, elles sont plus légères que les autres batteries et sont les mêmes batteries utilisées pour stocker des données dans les appareils photo numériques et les Smartphones. En effet, il serait possible que le véhicule puisse parcourir plus de 200 km avec cette batterie de nouvelle génération.

Le tableau II.1 représente une comparaison des différentes technologies des batteries.

Batterie	Plomb acide	Ni-Cd	Ni-Mh	Li-ion
Densité énergétique (Wh/kg)	30-50	45-80	60-120	160-200
Nombre de cycles (Charge/Décharge)	500 à 800	1000 à 2000	600 à 1500	400 à 1200
Temps de charge	60 à 12h	1 à 2h	2 à 4h	2 à 4h
Température de fonctionnement	-20 à 60C°	-40 à 60C°	-20 à 60C°	-20 à 60C°

Table II.1. Tableau comparatif des différentes technologies des batteries

II.5.2. Les supercondensateurs

Les supercondensateurs (Figure II.11) stockent l'énergie sous forme électrostatique. Ils sont des systèmes de stockage d'énergie de faible densité d'énergie mais d'une densité de puissance importante. Par conséquent, ils sont utilisés dans les phases transitoires pour fournir

les pics de puissance demandés, afin de réduire les sollicitations en courant, de diminuer la taille et d'augmenter la durée de vie de la source principale d'énergie (batteries ou pile à combustible) [23].



Figure II.11. Exemple de super condensateur

Un supercondensateur se compose de deux collecteurs métalliques (Figure II.12) chacun couplés à deux électrodes carbonées, poreuses et imprégnées d'électrolyte.

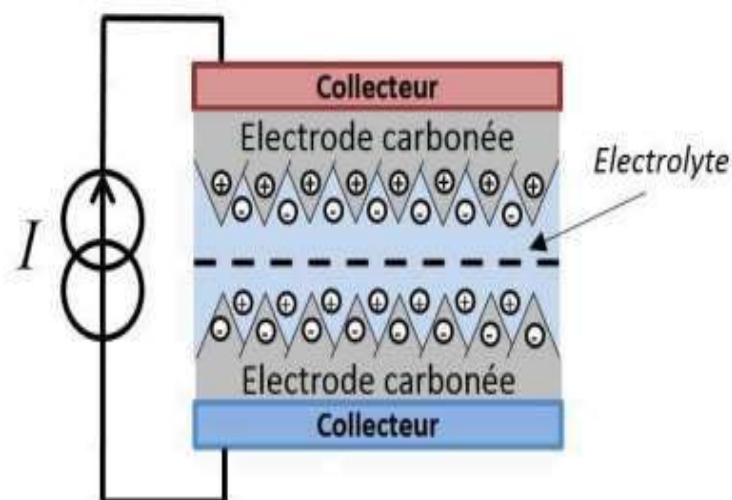


Figure II.12. Composition d'un supercondensateur

II.5.2.1. Principe de fonctionnement

Un supercondensateur se présente sous la même forme qu'un condensateur électrochimique classique à la seule différence qu'il ne possède pas de couche diélectrique dans sa partie électrolytique liquide. L'isolement entre les deux électrodes se fait par l'intermédiaire du solvant contenu dans l'électrolyte. En et, ces supercondensateurs n'exploitent pas la polarisation diélectrique pour le stockage de l'énergie mais la double couche électrique qui apparaît à l'interface électrode/électrolyte.

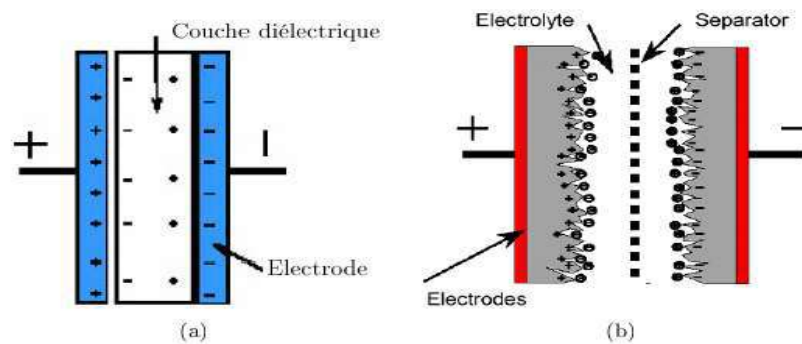


Figure II.13. Supercondensateur (a) , Condensateur(b) [24]

Le principe de base de la technologie du supercondensateur repose sur la théorie de la double couche d'Helmholtz qui décrit l'accumulation des charges électriques à l'interface entre un conducteur ionique (électrolyte) et un conducteur électronique de haute surface spécifique (électrode). Le condensateur ainsi créé se caractérise par une capacité de valeur très élevée, résultant d'une surface d'interface (s) très élevée et d'une épaisseur (e) d'extension de la double couche très faible.

Selon la nature des processus électrostatique et électrochimique de stockage d'énergie on distingue deux types des supercondensateurs : les supercondensateurs électrostatiques et les supercondensateurs électrochimiques. Pour les supercondensateurs de type électrostatique, le stockage de l'électricité s'exécute par un simple déplacement des charges électroniques et ioniques. Quant aux supercondensateurs de type électrochimique, en plus du déplacement des charges électroniques et ioniques, interviennent des processus faradiques réversibles. Le coût actuel de ce dispositif de stockage d'énergie électrique est de l'ordre de 0,01 Euros/F et les constructeurs estiment que vers 2010, il sera de 0,005 Euros/F [24].

II.6. Différents moyens de recharge des véhicules électriques

L'obligation pour une utilisation régulière des véhicules électriques, demande absolument une recharge sollicitée par leur autonomie limitée qui pose des problèmes techniques 'électronique de puissance, surtout pour sa mise en œuvre rapide ainsi qu'une standardisation des prises qu'implique un accès universel et sécurisé dans l'espace public.

II.6.1. L'échange de batteries

Les bornes de recharge rapide garantissent 80 % de la charge du véhicule électrique en une demi-heure. Belle avancée mais encore loin des quelques minutes nécessaires pour faire le plein de bons vieux véhicules essence. Pourquoi alors ne pas simplement remplacer les batteries déchargées par des batteries entièrement gonflées Le client ne sera pas propriétaire

mais louera ses batteries de voiture. Bien entendu, cette solution nécessitera une standardisation de l'emplacement et de la forme des batteries.

La figure II.13 montre dans l'action, l'échange du pack de batteries au lithium-ion embarqué dans le Roadster de Tesla Motors (un petit véhicule de sport à deux places).



Figure II.14. Installation du pack de batteries au lithium-ion à bord du Roadster de Tesla

II.6.2. La recharge par induction

Le constructeur automobile Nissan 26 a développé, en collaboration avec la société Show Air-craftIndustry 27, un nouveau système pour recharger sans contact des batteries de voitures électriques lorsque celles-ci sont en stationnement dans des parkings spécialement aménagés.

Le principe, relativement simple, utilise l'induction électromagnétique entre deux bobines. La version proposée délivre 10 kW et est prévue pour l'espace public, une version moins puissante de 3 kW à 6 kW est envisagée pour les résidences. La compagnie Evatran 28 basée en alifornie teste depuis 2009 un système similaire qu'elle commercialise maintenant pour Nissan Leaf et Chevrolet Volt. Ce système représenterait une avancée majeure si des villes ou des tronçons d'autoroute en étaient équipés, donnant aux véhicules électriques une plus grande autonomie que celle des véhicules à énergie fossiles. Le KAIST (Korea Advanced Institute of Science and Technologie) a d'ailleurs développé ce système pour les tramways d'un parc d'attraction, les bus de son campus et maintenant également des bus de la ville de Gumi en Corée du Sud [20].

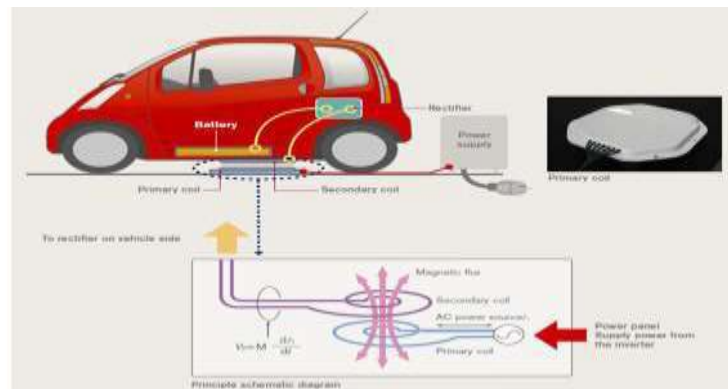


Figure II.15. Schéma présentant le chargeur à induction

II.6.3. Les chargeurs branchables

Il existe de nombreux nouveaux types et normes de recharge des véhicules électriques. En plus du connecteur physique utilisé, la puissance fournie a un impact important sur la charge. Plusieurs niveaux ont été définis, dont :

- ❖ **Le niveau 1** : il correspond à une prise de courant conventionnelle en courant alternatif et ne délivre qu'une faible puissance, la recharge complète du véhicule pourra prendre jusqu'à 12 heures.
- ❖ **Le niveau 2** : il correspond à une installation spécifiquement destinée à la recharge des véhicules, toujours en courant alternatif, la puissance délivrée est bien supérieure ce qui permet la recharge d'un véhicule en 2,5 à 5 heures.
- ❖ **Le niveau 3** correspond non plus à une interface entre le réseau électrique et le chargeur du véhicule mais à un chargeur de batteries en courant continu. Aussi appelé « charge rapide », ce niveau de charge puissant permet une recharge à 80% du véhicule en un peu moins d'une demi-heure [12].

II.7. Avantages et inconvénient des véhicules électriques

Les voitures électriques font d'énormes progrès technologiques depuis le jour de leur création et leur popularité augmente chaque minute et chaque jour qui passe, mais avec tout cela, la controverse sur les avantages et les inconvénients des voitures électriques a augmenté.

II.7.1. Avantages

- Les véhicules électriques sont dépourvus de pollution sonore puisqu'ils sont totalement silencieux.

- Les véhicules électriques sont agréables à conduire, avec un roulement qualifié de « doux » en raison d'une accélération continue et progressive car le moteur ne cale jamais (absence d'embrayage).
- L'architecture technique des véhicules électriques est simple et composée de 6000 pièces de moins qu'une auto traditionnelle.
- Les véhicules électriques ne consomment pas d'énergie dans les embouteillages et les freinages (la voiture se recharge seule). Ils sont donc très adaptés au milieu urbain qui sera le principal mode d'habitat du futur (mégapole).

II.7.2. Inconvénients

- D'autant que comme les produits innovants ont un coût souvent élevé, le prix de ces voitures devrait être élevé.
- La durée de vie de la batterie et la puissance du moteur électrique ne sont pas encore très importantes. Ainsi la durée de recharge des batteries électriques est encore importante. De plus, lors d'utilisation, le moteur électrique ne produit pas de chaleur. L'habitacle de la voiture n'est pas chauffé. Pour un meilleur confort (climatisation, radio, etc.), la décharge des batteries est accélérée.
- Le problème d'autonomie.

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous donnons un aperçu des véhicules électriques puis révélons leur évolution dans le temps, puis nommons les différentes classifications par sources d'énergie et sur le chemin pour révéler différentes technologies de stockage et de transmission d'énergie.

Nous avons également présenté des sources d'énergie électrique pouvant être envisagées pour des applications de véhicules électriques. Informations clés du profil de sélection entre ces différentes sources d'énergie, ainsi que des performances en termes de densité d'énergie, de coût, de fiabilité et de sécurité d'utilisation. Dans ce cas, les batteries lithium-ion ont des énergies spécifiques élevées contribuant à l'augmentation de l'autonomie des véhicules tout électriques, ainsi que des masses importantes favorables à ces hybrides.

Chapitre III

Dimensionnement et Modélisation

III.1. Introduction

Dans le troisième chapitre, nous expliquerons la méthode de mise à l'échelle et de modélisation des composants d'un système hybride totalement indépendant. Ce chapitre est divisé en deux parties:

Dans une première partie, nous nous intéressons au dimensionnement de la source d'alimentation principale (source photovoltaïque), de l'élément de stockage (batteries, supercondensateurs) et des convertisseurs DC-DC.

Pour la deuxième partie, il sera utilisé pour modéliser le comportement des éléments d'un système hybride complètement indépendant.

III.2. Dimensionnement et modélisation du système de recharge

III.2.1. Présentation du système de recharge

Le schéma de principe du système de recharge des sources d'énergie embarquées dans le véhicule est représenté sur la figure III.1. Il est constitué de deux parties principales :

- ✓ Un système photovoltaïque autonome
- ✓ Un système interdépendant embarqué dans le véhicule

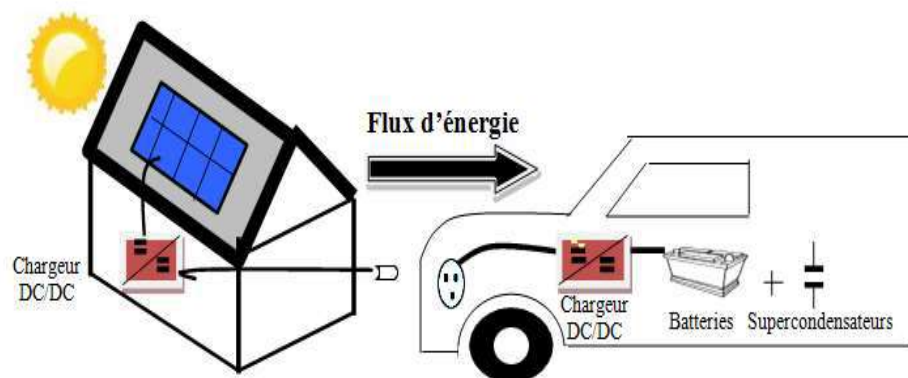


Figure III.1. Schéma de principe du système de recharge

III.2.2. Dimensionnement énergétique du système de recharge

Avant toutes études d'un système, le dimensionnement de ses composants est une étape déterminante afin d'assurer un bon fonctionnement même dans des situations instables. Pour cela, le choix de ces composants devra être effectué suivant une méthodologie bien précise.

III.2.2.1. Dimensionnement du système photovoltaïque autonome

Le système photovoltaïque autonome (PV) dans son ensemble comprend :

- Une source photovoltaïque.
- Un moyen de stockage (pack de batteries au lithium-ion et supercondensateurs).
- Un convertisseur DC-DC lié aux panneaux PV
- Un convertisseur DC-DC lié aux batteries lithium-ion
- Un convertisseur DC-DC lié aux supercondensateurs

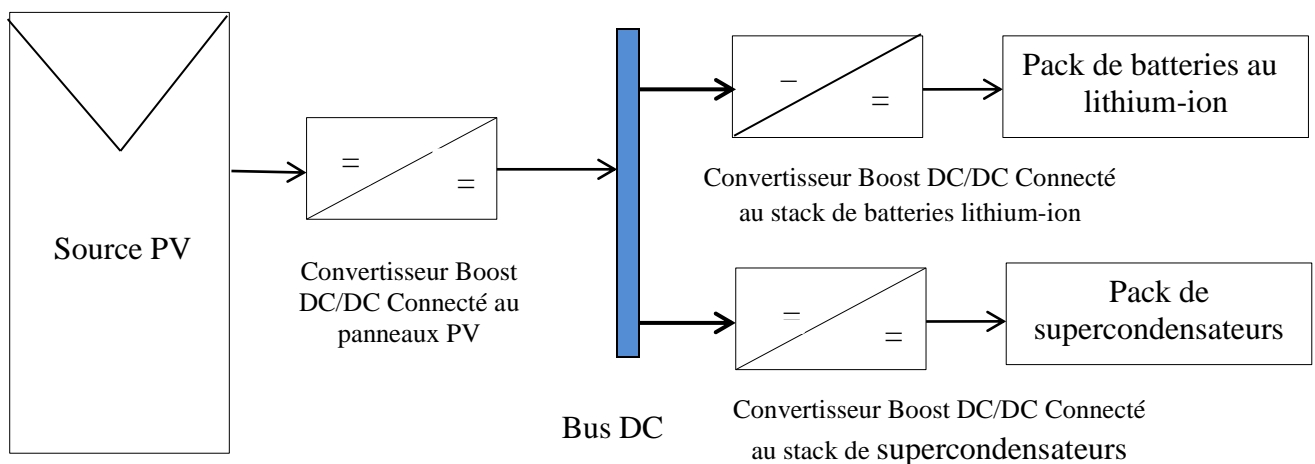


Figure III.2. Configuration du système hybride autonome

Le dimensionnement affecte le prix et la qualité d'un système PV dans un endroit isolé, il s'agit donc d'une étape critique lors de la configuration du système. Dépend de:

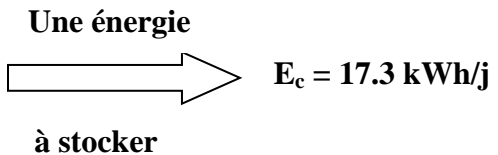
- De l'éclairement sur le site au cours de l'année.
- De l'énergie à stocker dans le pack de batteries.
- Du rendement énergétique de l'ensemble des composants constituant le système.

Le dimensionnement des composants du système PV autonome comprend :

- Dimensionnement de la source PV.
- Dimensionnement du moyen de stockage hybride.
- Dimensionnement de convertisseur courant-continu (DC / DC) de la source PV
- Dimensionnement de convertisseur DC-DC lié aux batteries lithium-ion
- Dimensionnement de convertisseur DC-DC lié aux supercondensateurs

III.2.2.1.1. Dimensionnement de la source PV

La source photovoltaïque a été installée sur le toit de la maison, et sa taille a été ajustée pour répondre à la production d'énergie à stocker dans le pack batterie. Le classement donne les besoins énergétiques E_c pour :

- **Le pack de batteries au lithium-ion : 17 kWh/j**
 - **Le pack de super-condensateurs : 0.3 kWh/j à stocker**
- Une énergie**

 $E_c = 17.3 \text{ kWh/j}$

L'énergie E_p produite par la source photovoltaïque se calcule en fonction des besoins en énergie par la relation suivante :

$$E_p = \frac{E_c}{k_1} \quad (\text{III.1})$$

Le coefficient k_1 tient compte des facteurs suivant :

- ✓ L'incertitude météorologique.
- ✓ L'inclinaison non corrigée de la source suivant la saison.
- ✓ La perte de rendement de la source dans le temps (vieillesse et poussières).
- ✓ Les pertes dans les câbles et connexions.

Pour les systèmes équipés d'un stack de batteries, le coefficient k_1 est généralement compris entre 0,55 et 0,75. La valeur approchée utilisée pour ce type de système est souvent égale à 0,65 [25]. Dans ce cas, l'énergie journalière E_p à produire par la source PV afin de recharger les batteries et supercondensateurs est égal à **26.615 kWh**.

➤ La puissance crête de la source PV peut être calculée par l'équation suivante :

$$P_c = \frac{E_p}{t_e} \quad (\text{III.2})$$

Avec :

P_c : puissance crête de la source PV [Wc]

E_p : énergie journalière produite [Wh/j]

t_e : nombre d'heures d'éclairement équivalentes par jour [h/j]

L'énergie solaire journalière G reçue par la ville d'Ouargla durant le mois de décembre (le mois le plus défavorable) est de 3091.7 W/m²/jour [26] correspondant à 3.0917 d'heures d'éclairement par jour. Dans ce cas, la puissance crête de la source PV est : **$P_c = 8608.5 \text{ Wc}$** .

- La surface totale des panneaux installées sur le toit de la maison peut être déterminée par :

$$S_{\text{tot}} = \frac{E_p}{\eta \cdot G} \quad (\text{III.3})$$

Où :

η : rendement de la source PV

G : rayonnement moyen quotidien [$\text{Wh}/\text{m}^2/\text{j}$]

- Le nombre total des panneaux constituant la source PV est donnée par :

$$N_{\text{tot}} = \frac{S_{\text{tot}}}{S_{\text{pv}}} \quad (\text{III.4})$$

Où S_{pv} est la surface d'un seul panneau, et elle vaut 0.3839 m^2 .

En considérant les caractéristiques du panneau PV AEG-40 mentionnées dans le tableau III.1, la surface totale de la source S_{tot} de la source PV et le nombre total des panneaux N_{tot} nécessaires sont respectivement : $S_{\text{tot}} = 86.08 \text{ m}^2$ et $N_{\text{tot}} = 224$ panneaux.

en serie 2 panneau et 112 panneau

Ainsi, les caractéristiques de la source PV sont résumées dans le tableau III.2.

Puissance maximale [W]	Tension de circuit ouvert [V]	Courant de court-circuit [A]	Tension optimale [V]	Courant optimal [A]	Rendement [%]
38.29	22.4	2.41	17.45	2.2	10

Tableau III.1. Caractéristiques du panneau PV AEG-40 [27]

Puissance crête [Wc]	Surface totale [m^2]	Nombre total des panneaux
8608.5	86.08	224

Tableau III.2. Caractéristiques de la source PV

III.2.2.1.2. Dimensionnement des batteries lithium ion

Le dimensionnement du stack de batteries requiert une attention particulière afin d'augmenter sa durée de vie et par la même occasion assurer l'autonomie du système et diminuer son coût global.

$$C_{BV} = \frac{E_{BV} \times Aut_V}{V_{BVn} \times D_{BV}} \quad (III.5)$$

La capacité nominale du pack de batteries est donnée par la relation (III.5).

Avec :

C_{BV} : Capacité nominale du pack [Ah]

E_{BV} : Energie journalière à stocker dans le pack [Wh/j]

Aut_V : Nombre de jours d'autonomie

V_{BVn} : Tension nominale du pack [V]

D_{BV} : Profondeur de décharge du pack [%]

Dans le cas en question, pour une énergie stockée de 17000Wh sous une tension de 216 V et une profondeur de décharge de 90 %, la capacité que devrait avoir le pack de batteries au lithium-ion pour une autonomie de 1 jour serait **87.45 Ah**.

Pour déterminer le nombre de batteries constituant le pack, la batterie au lithium-ion GS YUASA LIM30H est sélectionnée. Les caractéristiques de cette batterie sont regroupées dans le tableau III.5.

Capacité Nominale [Ah]	Tension nominale [V]	Densité d'énergie Massique [Wh/kg]	Densité d'énergie Volumique [Wh/l]
30	3.6	51	118

Tableau III.3. Caractéristiques de la batterie GS YUASA LIM30H [28]

Les équations (III.6), (III.7) et (III.8) permettent de calculer le nombre des batteries en série, N_{BVS} , en parallèle, N_{BVP} , et total N_{BVTOT} .

$$N_{BVS} = \frac{V_{BVn}}{V_{bvn}} \quad (III.6)$$

$$N_{BVP} = \frac{C_{BV}}{C_{bvn}} \quad (III.7)$$

$$N_{BVTOT} = N_{BVS} \times N_{BVP} \quad (III.8)$$

Où :

V_{bvn} : Tension nominale d'une seule batterie [V]

C_{bvn} : Capacité nominale d'une seule batterie [Ah]

Les caractéristiques du pack de batteries au lithium-ion sont regroupées dans le tableau III.6.

Tension du pack [V]	Capacité du pack [kWh]	Profondeur de décharge du pack [%]	Nombre des batteries en série	Nombre des batteries en parallèle	Nombre des batteries	Poids du pack [kg]	Volume du pack [l]
216	17	90	60	3	180	334	145

Tableau III.4. Caractéristiques du pack de batteries au lithium-ion

III.2.2.1.3. Dimensionnement des supercondensateurs

Le dimensionnement des supercondensateurs consiste à déterminer le nombre d'éléments qu'il faut placer en série, N_s , et en parallèle, N_p , afin de faire face aux fortes sollicitations [29].

Le modèle équivalent du pack de super condensateurs est formé d'une capacité équivalente C_{SC} en série avec une résistance équivalente R_{SC} [29-32] comme montré dans la figure III.8.

Les équations allant de (III.15) à (III.18) relient les grandeurs électriques du pack aux grandeurs au niveau du condensateur élémentaire.

$$C_{SC} = \frac{N_p}{N_s} \times C_{\text{élé}} \quad (\text{III.9})$$

$$R_{SC} = \frac{N_s}{N_p} \times R_{\text{élé}} \quad (\text{III.10})$$

$$V_{SC} = N_s \times V_{\text{élé}} \quad (\text{III.11})$$

$$I_{SC} = N_p \times I_{\text{élé}} \quad (\text{III.12})$$

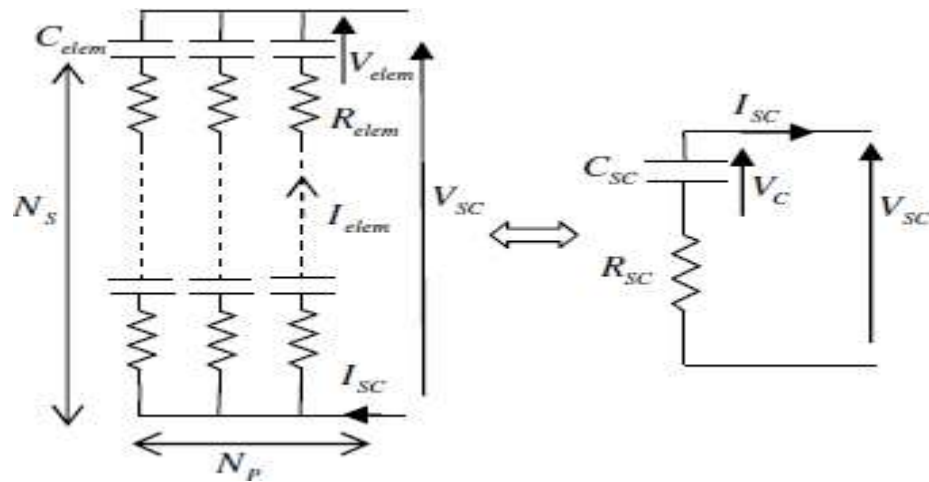


Figure III.8. Modèle d'un pack de supercondensateurs

L'énergie maximale transférée par l'élément de stockage E_{\max_transf} est la différence entre son état d'énergie maximal E_{\max} et minimal E_{\min} . Elle est liée à la tension à vide maximale V_{sc_max} et V_{sc_min} minimale du pack par l'équation (III.19).

$$E_{\max_transf} = E_{\max} - E_{\min} = \frac{1}{2} C_{sc} (V_{sc_max}^2 - V_{sc_min}^2) \quad (\text{III.13})$$

Le nombre de supercondensateurs élémentaires N_{elem} nécessaires pour fournir la demande d'énergie maximale est ainsi donné par l'équation (III.14).

$$N_{elem} = N_p \times N_s = \frac{E_{\max_transf}}{C_{elem} \times V_{elem_max}^2} \frac{2}{1-k_p^2} \quad (\text{III.14})$$

k_p désigne la profondeur de décharge définie en tant que rapport entre la tension minimale et maximale d'un élément.

Nous avons sélectionné la cellule de supercondensateur BOOSTCAP des technologies MAXWELL notamment le BCAP2000 P270 dont les caractéristiques sont résumées dans le tableau III.7.

C _{elem} [F]	V _{elem_max} [V]	R _{elem} [Ω]	Poids [kg]
2000	2.7	0.00035	0.36

Tableau III.5. Caractéristiques d'une cellule supercondensateur de type BCAP2000 P270 [29]

Pour une énergie maximale transférée de 0.3 kWh et pour une profondeur de décharge de 0,5 [29], le nombre de supercondensateurs élémentaires, N_{elem} , est égal à 198 éléments.

D'autre part, la puissance aux bornes du pack donnée par l'équation (III.21), nous permet de calculer le courant élémentaire maximal correspondant à la puissance maximale de **60 000W**.

$$P_{sc} = N_{\text{elem}} (V_{\text{elem}} \times I_{\text{elem}} - R_{\text{elem}} \times I_{\text{elem}}^2) \quad (\text{III.15})$$

Ayant trouvé le courant élémentaire maximal égal à 684 A, nous passons à calculer le nombre d'éléments supercondensateurs en série, N_s , et le nombre d'éléments supercondensateurs en parallèle, N_p , en utilisant les équations (III.22) et (III.23).

$$N_s = \frac{V_{SC_max}}{V_{\text{elem max}}} = \mathbf{33} \quad (\text{III.16})$$

$$N_p = \frac{N_{\text{elem}}}{N_s} = \mathbf{6} \quad (\text{III.17})$$

Pour $V_{\text{elem max}} = 2.7 \text{ V}$, les différentes caractéristiques du pack de supercondensateurs sont regroupées dans le tableau III.8.

C_{sc} [F]	R_{sc} [mΩ]	V_{SC_max} [V]	I_{SC_max} [A]	E_{max} [kJ]	E_{min} [kJ]	Poids [kg]
363.64	1.925	89	684	1440.1962	360.1962	71.28

Tableau III.6. Caractéristiques du pack de supercondensateurs

III.2.2.2. Dimensionnement des convertisseurs continu/continu (hacheurs)

La détermination des éléments des convertisseurs DC-DC connectés aux stacks de batteries lithium ion, et supercondensateurs et de la source PV consiste à calculer la valeur de la capacité de filtrage C_{dc} du bus continu et les valeurs des inductances de lissage L_{ba} , L_{pv} , L_{sc} .

III.2.2.2.1. Convertisseur DC-DC lié aux panneaux PV

Le convertisseur relié aux panneaux PV est un convertisseur « Boost » appelé aussi : « Survolteur ».

➤ Le mode Boost

Dans le cas où le transfert d'énergie s'effectue dans un seul sens, de la source vers le bus continu et la charge, les différents convertisseurs sont, alors, en mode « Boost » ou

élévateur de tension qui permet d'élever les niveaux de tension à leurs entrées à la valeur de la tension du bus continu qui est de 48V.

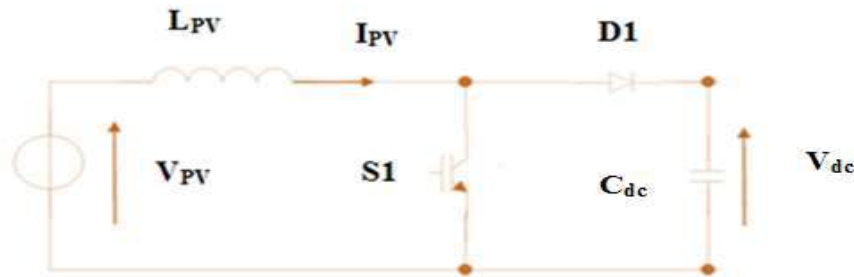


Figure III.9. Schéma du convertisseur Boost lié aux panneaux PV

L'expression de l'inductance de lissage d'un convertisseur Boost est calculée par :

$$L_{PV} = \frac{V_{dc}}{4f\Delta I_{PV_max}} \quad (III.18)$$

Pour le condensateur de filtrage ayant une capacité C_{dc} (voir figure III.9), il permet de limiter les ondulations de tension qui résultent du courant alternatif dans le condensateur de sortie. La valeur minimale du condensateur est déterminée par la relation suivante :

$$C_{dc} = \frac{I_{PV_max}}{4f\Delta V_{dc}} \quad (III.19)$$

Dans ce cas, nous aurons pour : $V_{dc} = 48V$, $f = 20KHz$, $I_{PV_max} = 246.4A$, $\Delta I_{PV_max} = 2\% \times I_{PV_max} = 4.928A$ et $\Delta V_{dc} = 5\% \times V_{dc} = 2.4V$, les valeurs suivantes :

$$L_{PV} = 0.0001 \text{ H}$$

$$C_{dc} = 0.0013 \text{ F}$$

Avec :

V_{dc} : Tension moyenne du bus capacitif [V]

f : Fréquence de découpage des convertisseurs [Hz]

ΔI_{max} : Ondulation maximale du courant dans l'inductance [A]

I_{max} : Courant à travers l'inductance [A]

ΔV_{dc} : Ondulation de la tension aux bornes du condensateur de sortie [V]

III.2.2.2.2. Convertisseur DC-DC lié aux batteries

Le convertisseur connecté au module de batteries possède deux structures : il fonctionne en mode « Buck » dans le cas où l'énergie électrique est à acheminer et en mode « Boost » lorsqu'il fournit de l'énergie électrique au bus continu.

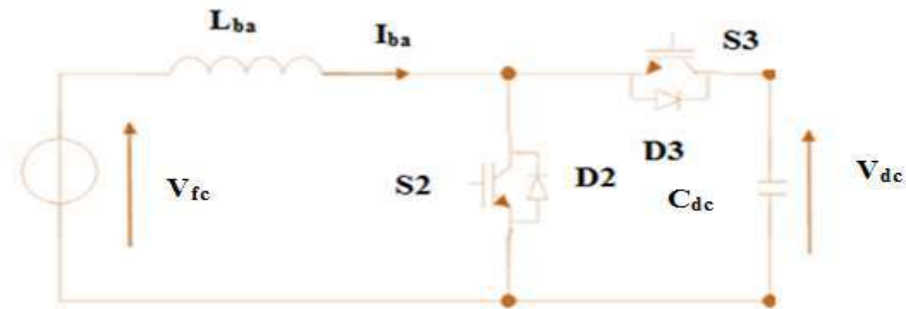


Figure III.10. Schéma du convertisseur Boost lié aux batteries lithium ion

L'expression de l'inductance de lissage d'un convertisseur Boost est calculée par :

$$L_{ba} = \frac{V_{dc}}{4f\Delta I_{ba\ max}} \quad (III.20)$$

Dans ce cas, nous obtenons pour : $V_{dc} = 48V$, $f = 20Khz$, $I_{ba\ max} = 8.75A$, $\Delta I_{ba\ max} = 2\% * I_{ba\ max} = 0.174A$ et $\Delta V_{dc} = 5\% * V_{dc} = 2.4V$:

$$L_{ba} = 0.0034\ H$$

III.2.2.2.3. Convertisseur DC-DC lié aux supercondensateurs

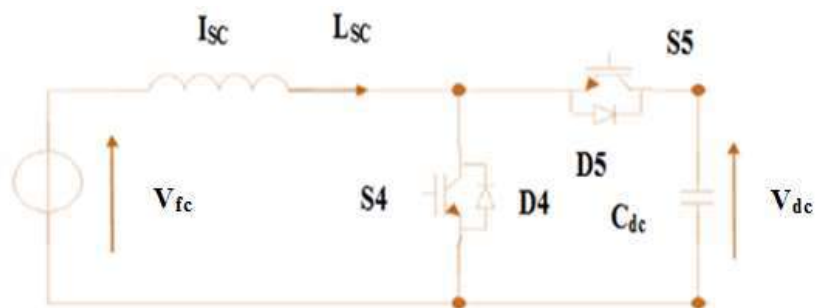


Figure III.11. Schéma du convertisseur Boost lié aux pack de supercondensateurs

La valeur de L_{sc} peut être déterminée pour un convertisseur Boost l'équation III.21.

$$L_{sc} = \frac{V_{dc}}{4f\Delta I_{sc\ max}} \quad (III.21)$$

Dans ce cas, nous aurons pour : $V_{dc} = 48V$, $f = 20Khz$, $I_{sc_max} = 684A$, $\Delta I_{sc_max} = 2\% * I_{sc_max} = 13.68 A$ et $\Delta V_{dc} = 5\% * V_{dc} = 2.4V$, la valeur L_{sc} suivante : $L_{sc} = 4.39.10^{-5} H$

III.3. Modélisation du système hybride autonome

La modélisation d'un système permet d'une meilleure compréhension de son fonctionnement et donner la priorité au comportement de ses composants pendant la durée de son utilisation, simplifiant ainsi le travail. Dans notre cas, divers éléments du système hybride ont été modélisées séparément, elles doivent donc être intégrées raviver l'ensemble du système [33].

Pour modéliser un système hybride, il faut faire la :

- ✓ Modélisation de la source PV.
- ✓ Modélisation du moyen de stockage hybride.

III.3.1. Modélisation de la source PV

Un panneau photovoltaïque peut être modélisé par le schéma équivalent montré dans la figure III.12.

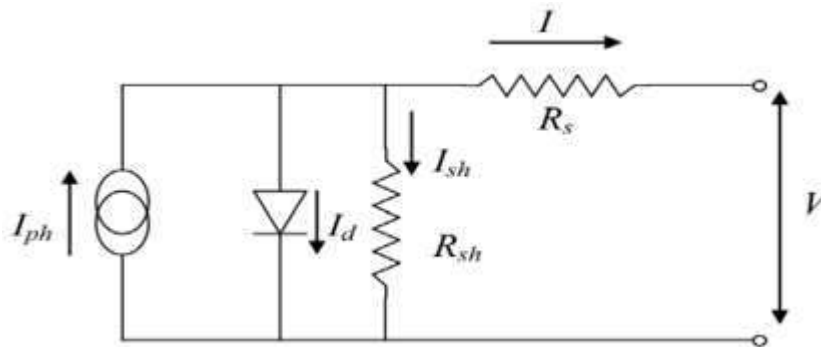


Figure III.12. Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque

Donc :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (III.22)$$

$$I_{ph} = [I_{cc} + K(T - T_{ref})] \frac{G}{G_0} \quad (III.23)$$

$$I_d = I_{od} \left(e^{\frac{q(V_{th} + R_s I)}{KT}} - 1 \right) \quad (III.24)$$

$$I_{sh} = \frac{V_{th} + R_S I}{R_{sh}} \quad (III.25)$$

$$I = I_{ph} - I_{od} \left(e^{\frac{q(V_{th} + R_S I)}{KT}} - 1 \right) - \frac{V_{th} + R_S I}{R_{sh}} \quad (III.26)$$

Avec :

I_s : Courant de saturation de la diode (A)

I_{ph} : Photo courant, ou courant généré par la cellule

R_s : Résistance série (Ω)

R_{sh} : Résistance shunt (Ω)

n : Facteur d'idéalité

V_{th} : Tension thermique ($V_{th} = kT/q$)

K : Constante de Boltzmann ($k = 1,38.10^{-23} \text{Jk}^{-1}$)

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

T : Température de la cellule (K)

Un générateur photovoltaïque est obtenu en mettant en parallèle et en série plusieurs cellules photovoltaïques. Pour notre travail, le module **PV AEG-40** a été choisi.

L'expression du courant passé par le module et sa tension aux bornes est donnée par les équations suivantes :

$$I_{CCmod} = N_{pcel} \times I_{CCcel} \quad (III.27)$$

$$I_{PPMmod} = N_{pcel} \times I_{PPMcel} \quad (III.28)$$

$$V_{COmod} = N_{SCel} \times V_{COcel} \quad (III.29)$$

$$I_{CCmod} = N_{SCel} \times I_{PPMcel} \quad (III.30)$$

$$V_{PPmod} = N_{SCel} \times V_{PPMcel} \quad (III.31)$$

Avec :

I_{CCmod} : Courant de court-circuit du module [A]

I_{PPMmod} : Courant au point de puissance maximale du module [A]

V_{C0mod} : Tension en circuit ouvert du module [V]

V_{PPmod} : Tension au point de puissance maximale du module [V]

N_{SCel} : Nombre de cellules connectées en série

N_{pcel} : Nombre de cellules connectées en parallèle

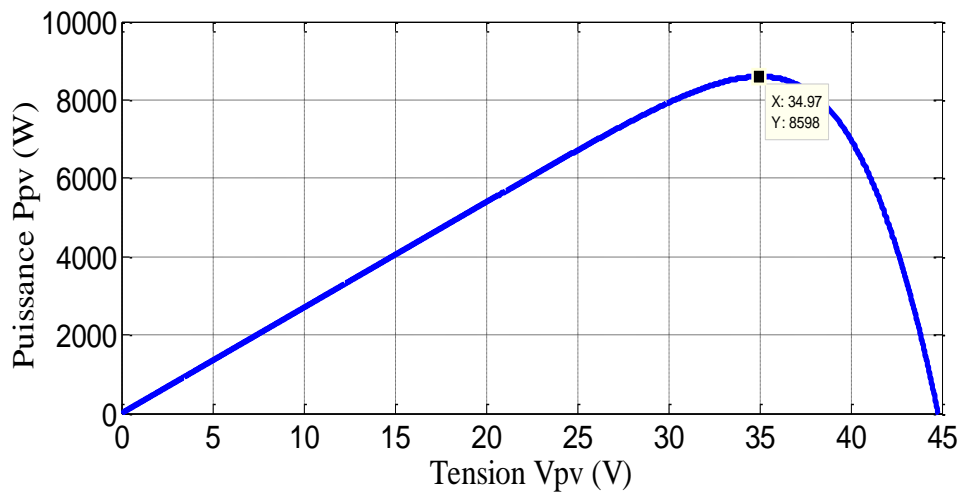


Figure III.13. Caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$ de la source PV dans les conditions standards

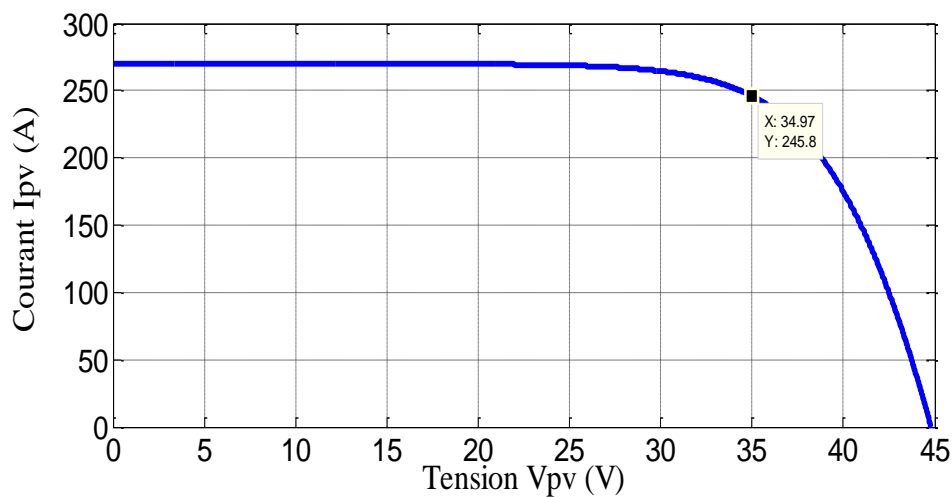


Figure III.14. Caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$ de la source PV dans les conditions standards

III.3.2. Modélisation des batteries lithium-ion

Il existe plusieurs types de batteries lithium-ion. Cependant, leur mise en oeuvre ne sont pas aisés en raison de plusieurs paramètres (température, résistance interne, etc.). Dans ce travail, nous avons choisi une batterie lithium-ion, modélisé par un circuit RC série.

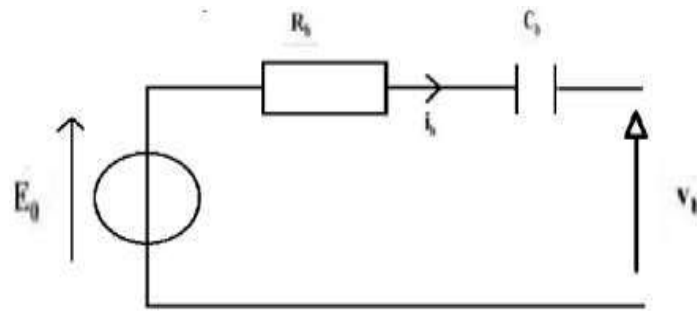


Figure III.15. Modèle R-C série d'une batterie lithium-ion [34]
En appliquant la loi des mailles, nous obtenons :

$$V_b = E_0 - V_{cb} - R_b i_b = E_0 - R_b i_b - \frac{1}{C_b} \int i_b dt \quad (\text{III.32})$$

Avec :

V_b : Tension de la batterie lithium ion [V]

E_b : Sa tension à vide [V]

i_b : Son courant [A]

R_b : Sa résistance [Ω]

Pour une installation composée de N_{bs} batteries en série et N_{bp} en parallèle, on peut écrire :

$$E_{ba0} = N_{bs} \cdot E_0 \quad (\text{III.33})$$

$$R_{ba} = \frac{N_{bs}}{N_{bp}} \cdot R_b \quad (\text{III.34})$$

$$C_{ba} = \frac{N_{bp}}{N_{bs}} \cdot C_b \quad (\text{III.35})$$

Nous définissons l'état de charge, EDC_{ba} , du stack comme étant le rapport entre sa capacité nominale C_{ban} et la quantité de charge Q_{mba} manquante par :

$$EDC_{ba} = \left(1 - \frac{Q_{mba}}{C_{ban}}\right) \times 100\% \quad (\text{III.36})$$

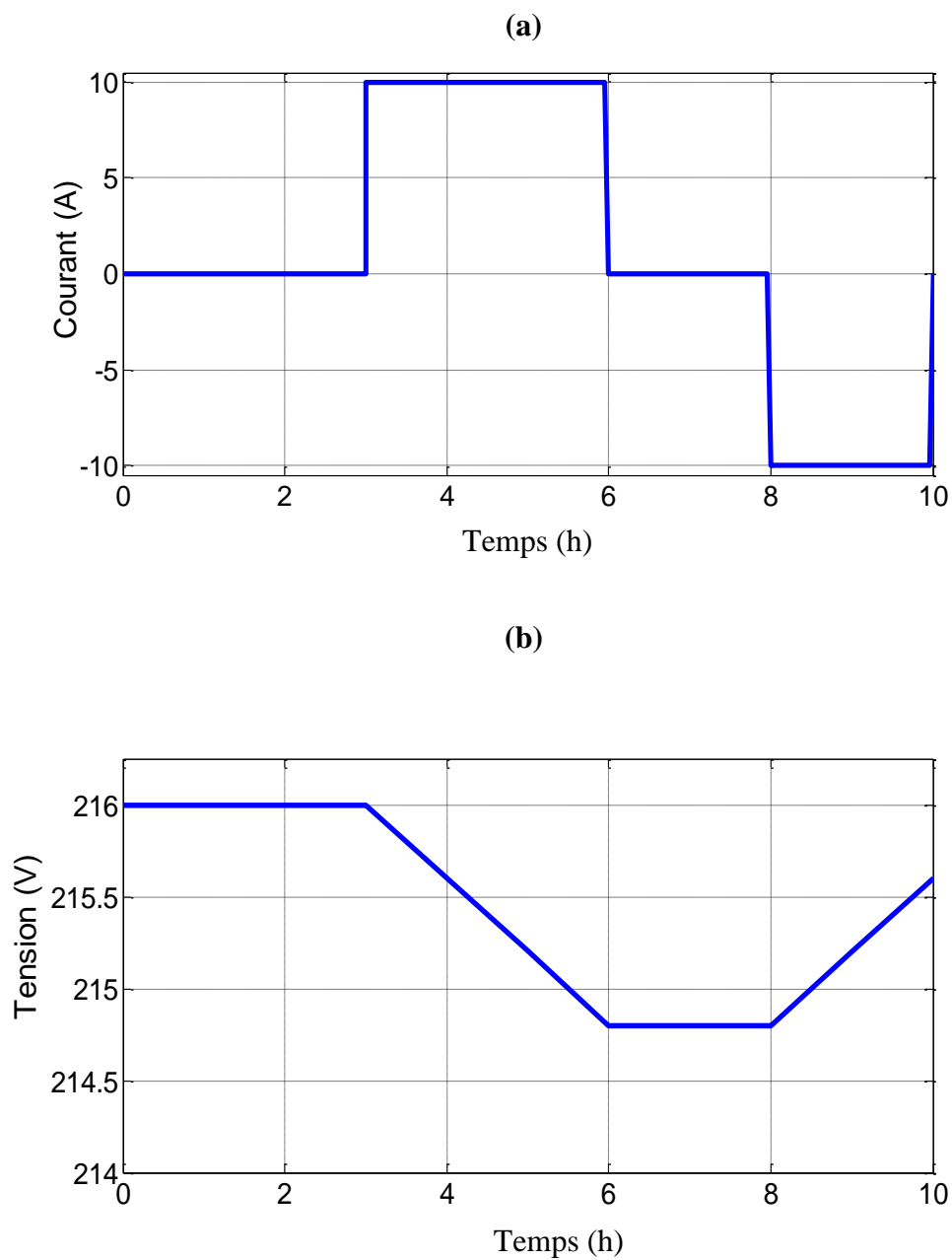
Avec :

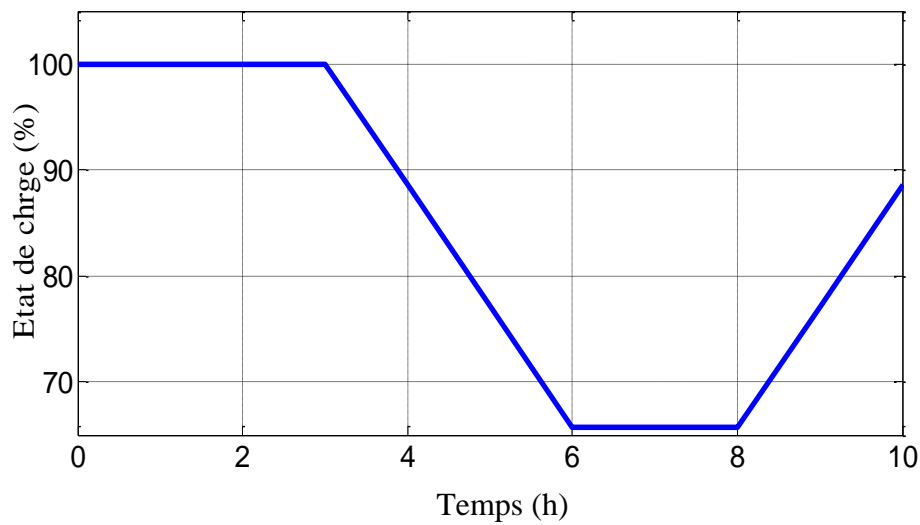
EDC_b : État de charge stack des batteries

C_{ban} : Capacité nominale

Q_{mba} : Quantité de charge manquante

Le tracé de la courbe de la tension, du courant et de l'état de charge en fonction du temps sont présentés sur les figures III.16.



**Figure III.16.**

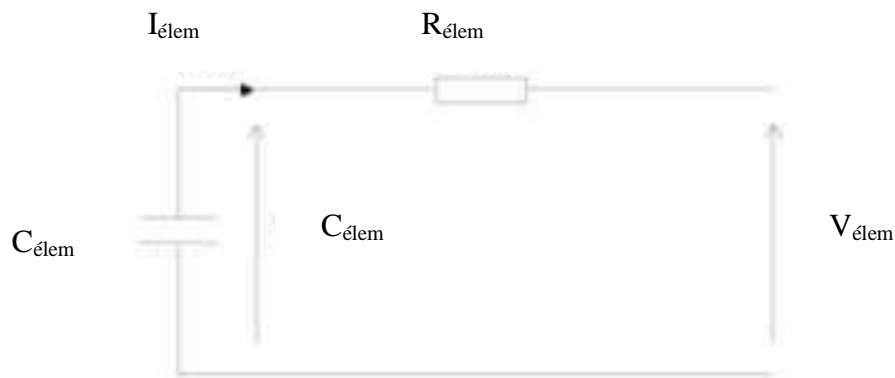
(a) : Courant constant de décharge/charge

(b) : Réponses en tension et en état de charge du stack de batteries

III.3.4. Modélisation d'un supercondensateur

L'utilisation de supercondensateurs comme moyen de stockage d'énergie à bord du véhicule passe par la réalisation d'un pack en associant plusieurs éléments en série et en parallèle. Le modèle équivalent d'un élément supercondensateur est un condensateur en série avec une résistance [35].

$$V_{\text{élé}} = V_{\text{célé}} - R_{\text{élé}} \cdot i_{\text{élé}} \quad (\text{III.37})$$

**Figure III.17.** Modèle d'un élément supercondensateur

Un supercondensateur qu'émettent en série les condensateurs diminue leur capacité équivalente pour obtenir une capacité élevée à une tension demandée ; un arrangement en série et en parallèle de plusieurs supercondensateurs est envisagé formant un module complet ou un

stack. La tension aux bornes d'un stack de supercondensateurs est déterminée par la relation III.38.

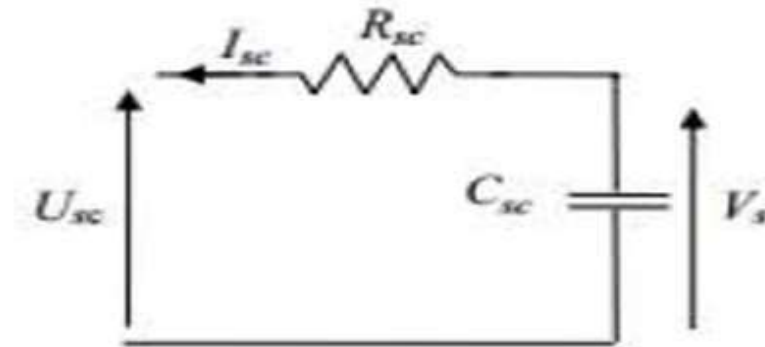


Figure III.18. Circuit équivalent du module de supercondensateurs

$$V_{sc} = V_{C_{sc}} - R_{sc} i_{sc} \quad (\text{III.38})$$

Avec :

C_{sc} : Capacité totale du module de supercondensateurs

R_{sc} : Résistance série totale du module de supercondensateurs

Q_{sc} : Quantité de charge stockée dans le module de supercondensateurs.

Le courant du module est donné par :

$$Q_{sc} = C_{sc} \cdot V_{sc} \quad (\text{III.39})$$

$$\frac{dQ_{sc}}{dt} = -I_{sc} \quad (\text{III.40})$$

L'état de charge appelé EDC_{sc} , caractérise la quantité d'énergie présentée dans le pack de supercondensateurs. Il vaut 100 % lorsque le pack est complètement chargé et 0 % lorsqu'il est chargé à sa valeur minimale.

$$EDC_{sc} = \left(\frac{4}{3} \left(\frac{E_{sc}}{E_{max}} - \frac{1}{4} \right) \right) \quad (\text{III.41})$$

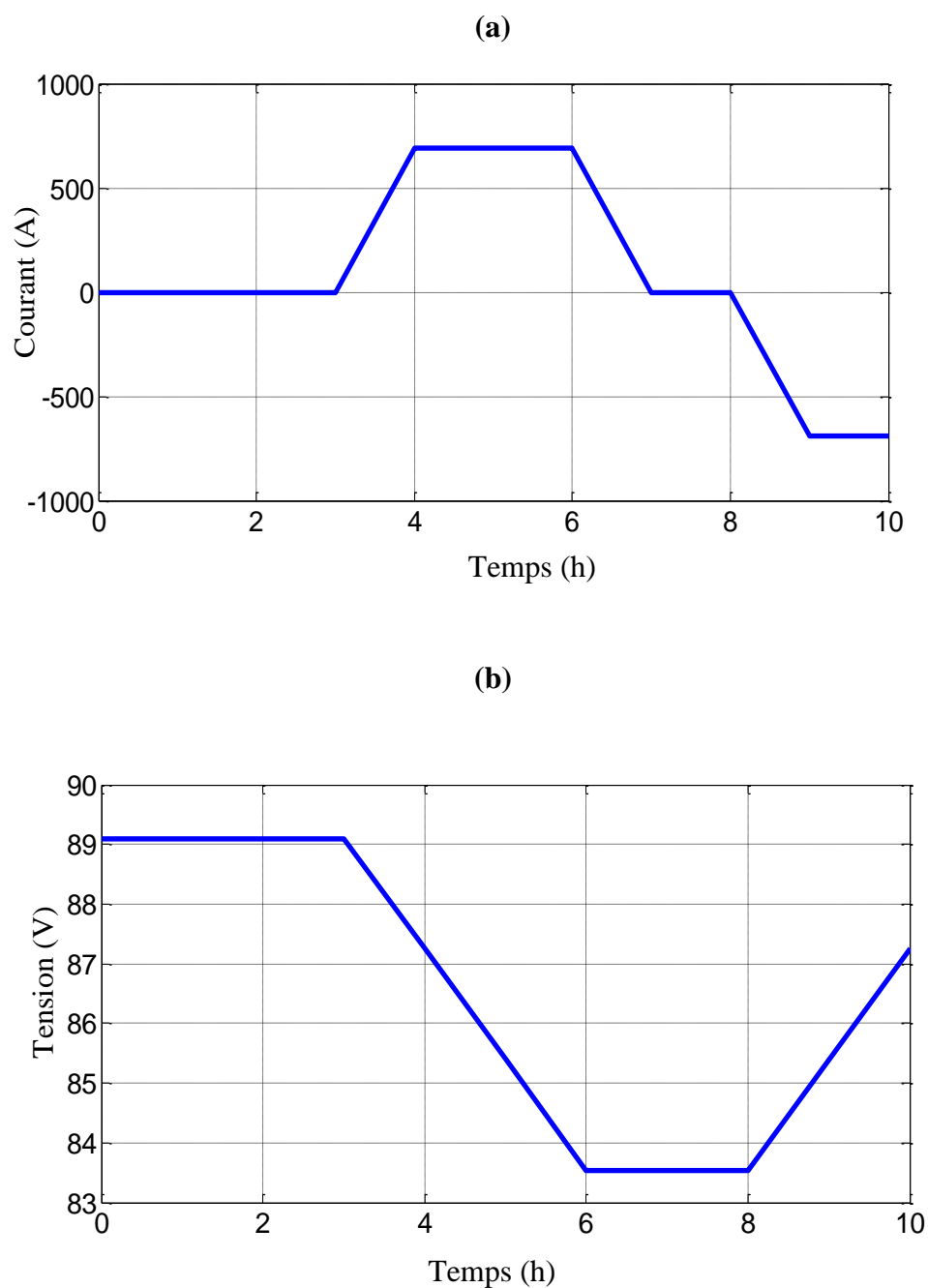
Avec :

EDC_{sc} : état de charge du stack [%]

E_{sc} : énergie contenue dans le stack [J]

E_{scmax} : énergie maximale contenue dans le stack [J]

Afin d'analyser les réponses en tension du stack, nous avons effectué une décharge/charge à un courant constant de 684 A. Les résultats obtenus sont exprimés sur la figure (III.19).



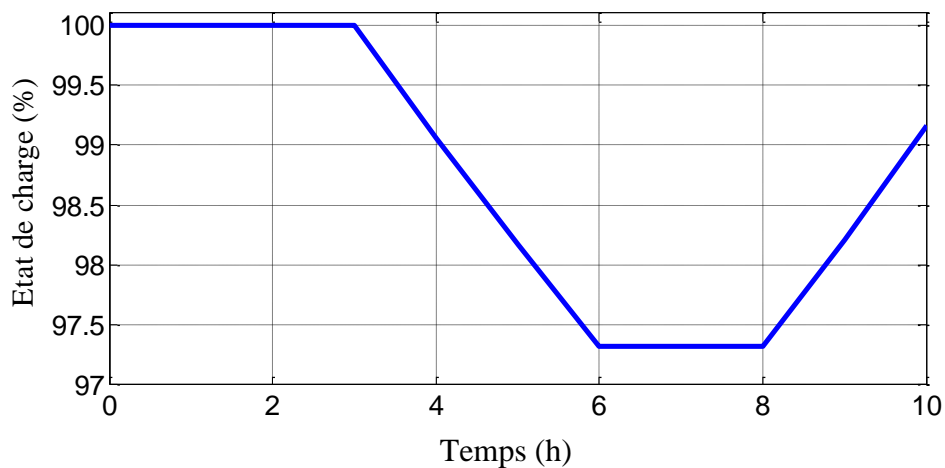


Figure III.19.

(a) : Courant constant de décharge/charge

(b) : Réponses en tension et en état de charge du stack de supercondensateurs

III.4. Conclusion

A travers ce chapitre, nous avons pris la valeur de l'éclairement sur la ville de Ouargla dans le but de dimensionner et modéliser la source photovoltaïque utilisée pour la recharge des batteries aux lithium-ion et les supercondensateurs optés pour assurer la traction du véhicule électrique.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail est de gérer la puissance d'un système hybride autonome pour la conduite d'un véhicule électrique composé d'une source principale, la source photovoltaïque, et de deux sources secondaires, à savoir des batteries lithium-ion et des supercondensateurs.

Dans le premier chapitre, nous avons vu des informations générales sur un système d'énergie renouvelable hybride avec un rappel sur la façon dont le PV est produit. Puis nous avons présenté les différentes techniques importantes des principaux composants qui composent ce système et ses principes de fonctionnement.

Dans le deuxième chapitre, nous avons parlé du véhicule électrique et de sa configuration principale, ainsi que de ses types, dont le véhicule hybride et le véhicule tout électrique, et de leurs sources d'énergie.

Parmi les sources que nous avons étudiées figurent les batteries lithium-ion et les supercondensateurs, qui sont connectés les uns aux autres pour former un système hybride et enfin les différents processus de charge ont lieu.

Dans le troisième chapitre, nous avons examiné la dimensionnalité et la modélisation des composants d'un système hybride entièrement autonome. Les trois sources d'alimentation (source photovoltaïque, batteries lithium-ion et supercondensateurs) sont connectées au bus de sortie DC du système via des convertisseurs d'interface DC-DC et sont toutes Boost.

Ces transformateurs permettaient de transférer la puissance des sources vers la charge et de la charge vers les éléments de stockage.



**Références
bibliographiques**

[1] **Benaouadj Mahdi** , « Contrôle d'une source hybride batteries /supercondensateurs, rechargée par l'énergie photovoltaïque,pour traction électrique « véhicule hybride » »,Université d'El-Oued Faculté des Sciences et de la Technologie mémoire de magistère 15/10/2012

[2] **Mr. Saad Saoud Merwan** , « Intitulé Optimisation de la gestion de l'énergie photovoltaïque utilisée dans une zone agricole », UNIVERSITE BADJI MOKHTAR–ANNABA- Faculté des Sciences de l'Ingénierat Département d'Electronique , -Année 2016/2017.

[3] **I.Benarif** « Dimensionnement d'un générateur photovoltaïque pour un système autonome dans la région de Ouargla » Mémoire de Master Université Kasdi Merbah-Ouargla 2018/2017.

[4] **M.Becherif, M.Y.Ayad, D.Hissel, R.Mkahl**, « Design and sizing of a standalone recharging point for battery electrical vehicles using photovoltaic energy », IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Chicago, Illinois, USA, 06-09 Septembre 2011, pp. 1-6.

[5] **M. P. Stéphane** « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques » thèse doctorat de l'université de Toulouse 20 Janvier 2009.

[6] **A. Lyes** « Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque » mémoire de magistère 05/05/2011.

[7] **O.BENSEDDIK, F. DJALOU**D, « étude et optimisation de fonctionnement d'un système photovoltaïque » mémoire de master 27 /06/2012.

[8] **Mr. Saad Saoud Merwan** , « Intitulé Optimisation de la gestion de l'énergie photovoltaïque utilisée dans une zone agricole », UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA- Faculté des Sciences de l'Ingénierat Département d'Electronique , - Année 2016/2017.

[9] **V. Boitier, C. Alonso**, (2013) Mémoire Pour l'obtention du titre de MAGISTER Option : Physique énergétique Présenté Par : SMAIL SEMAOUI Thème Etude de l'électrification d'un village avec de l'énergie solaire photovoltaïque Soutenu, le: 23 / 06 /2014 ; dimensionnement d'un Système Photovoltaïque.

[10] **F. Gama** – Yettou Revue des Energies Renouvelables CER'07 Oujda (2007) 141 – 144 ; Etude et simulation du fonctionnement des installations photovoltaïques.

[11] **Florence Mattera**, “Le stockage de l'électricité d'origine photovoltaïque”, Clefs CEA, N° 50/51, 2005, pp. 127-128.

[12] **M. Benaouadj, A. Aboubou, M. Becherif, M.Y. Ayad, M. Bahri**, “Recharging of Batteries/Supercapacitors Hybrid Source for Electric Vehicles Application using Photovoltaic Energy in a Stand-Alone Point”, First International Conference on Renewable Energies and Vehicular Technology (REVET), Hammamet, Tunisie, 26-28 Mars 2012, pp. 161-166.

[13] **Bertrand CHAUCHAT**, « Chargeur de batteries intégré pour véhicule électrique », thèse de doctorat, institut national polytechnique de Grenoble, France, 1997.

[14] **Harun TURKER** , « Véhicules Electriques Hybrides Rechargeables, Evaluation des Impacts sur le Réseau Electrique et Stratégies Optimales de Recharge », thèse de doctorat, université de Grenoble, France, 2012.

[15] <https://www.mobilitytechgreen.com/dossier-lhistoire-de-la-voiture-lectrique/>.

[16] **C. Espanet** , « Modélisation et conception optimale de moteurs sans balais à structure inversée - Application au moteur-roue » Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, Janvier 1999.

- [17] **MARIF Ismail & ABDAT Hichem** , « La commande en vitesse d'un véhicule électrique » Mémoire de Master Université Tlemcen 2019 .
- [18] **G. Malloy, M. Lachapelle**, Essence,hybride ou électrique :ce q'il faut savoir, Association Canadienne des Automobilistes.
- [19] **H. Benariba** , Contribution à la commande d'un véhicule électrique , Thèse de doctorat , Université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen , Décembre 2018.
- [20] **L. Angot** , La mobilité électrique dans les systèmes de transport et de mobilité urbains : constats et perspectives. Comment développer une nouvelle offre de mobilité durable par le biais de l'électromobilité dans la métropole toulousaine ?. Géographie. 2014.
- [21] **G. Henni** , Modélisation et Commande d'un véhicule électrique hybride , Mémoire de Magister , Université Hassiba Ben Bouali de Chlef.
- [22] **D. Sury** , La voiture électrique : révolution ou fausse bonne idée ?, Mémoire de master, Université Libre de Bruxelles, 2011.
- [23] **S. Butterbach** , Stockage d'énergie électrique par association de batteries au plomb et de supercondensateurs pour véhicule lourd, Thèse de doctorat, Université de technologie de Compiègne, septembre 2012.
- [24] **Olivier LANGLOIS**. Conception d'un réseau de secours électrique pour l'aéronautique.PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2006.
- [25] **Max Jimmy Tchana Nkouimi**, “Outil d'aide au dimensionnement des systèmes photovoltaïques domestiques”, Mémoire de fin d'études de l'École Nationale Supérieure Polytechnique de Yaoundé, 2009.
- [26] **Med Lakhdar LOUAZENE** , “Contribution à l'optimisation des systèmes photovoltaïques utilisés pour l'irrigation dans les zones sahariennes – Application

zone de Ouargla”, ‘ Tableau 2.3’ Thèse de Doctorat de UNIVERSITE EL HADJ LAKHDAR – BATNA Octobre 2015.

[27] **Rachid Maouedj**, “Application de l’énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah”, Mémoire de Magister de l’université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen, Décembre 2005.

[28] **V.Boitier, C. Alonso**, “Dimensionnement d'un Système Photovoltaïque”, CETSIS’2005, Nancy, 25-27 Octobre 2005.

[29] **M .Becherif, M.Y.Ayad, D.Hissel, R.Mkahl**, “Design and sizing of a standalone recharging point for battery electrical vehicles using photovoltaic energy”, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Chicago,Illinois, USA, 06-09 Septembre 2011, pp. 1-6.

[30] **Ali Daoudi**, “Etude et Simulation d’un Traqueur de Puissance Maximale d’un Système Photovoltaïque”, Mémoire de Magister de l’Université Mentouri de Constantine, 01 Juillet 2010.

[31] **Takefumi Inoue, Koichi Nishiyama, William A. Moll**, “Large-sized Li-ion Battery Module for Hybrid Powered Energy System”, Joint Service Power Expo, 24-26 Avril 2007.

[32] **Alid Hankache**, “Gestion optimisée de l’énergie électrique d’un groupe électrogène hybride à pile à combustible”, Thèse de Doctorat de l’Institut National Polytechnique de Toulouse, 16 Décembre 2008.

[33] **Mahdi Benaouadj**, "Contrôle d'une source hybride batteries/super condensateurs, rechargée par l'énergie photovoltaïque, pour traction électrique « véhicule hybride » ", Mémoire de Magister, Université d’El-Oued, 15 Octobre 2012.

[34] **B. Mahdi**, "Gestion de l'énergie d'un système hybride autonome pour application (Smart Grid)": Thèse de Doctorat d'Université Mohamed Khider Biskra, 04 / 06 / 2016.

[35] **Jérôme Lachaize**, "Étude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction", Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 20 Septembre 2004