

Projet de fin d'année

Panneaux photovoltaïques « Véhicule solaire »



Présenté par :

- Akcha Salma
- Eddiche Ikram
- Elazza Ikhlass
- Elhayyany Wiam

Encadré par :

- Oussama Hamed

Remerciement

Nous tenons à remercier dans un premier temps, toute l'équipe pédagogique de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, les intervenants professionnels responsables de la formation, et nos professeurs de nous avoir incités à travailler sur des projets durant cette période difficile en mettant à notre disposition leurs expériences et leurs compétences.

Avant d'entamer ce rapport, nous profitons de l'occasion pour remercier tout d'abord notre cher professeur Monsieur **Oussama Hamed** qui n'a pas cessé de nous encourager, ainsi pour sa générosité en matière de formation et d'encadrement. Nous le remercions également pour l'aide, les conseils, les remarques et suggestions évoquées dans ce rapport.

Résumé du rapport

Résumé

Durant ces dernières années, il y a eu un intérêt considérable pour les énergies renouvelables et plus particulièrement l'énergie photovoltaïque. La consolidation de cette dernière avec le domaine d'automobile va créer une grande évolution dans le domaine des transports.

Ce projet porte sur la réalisation d'un véhicule solaire, commandé à distance par Bluetooth, avec une analyse globale sur le principe de fonctionnement des panneaux photovoltaïques, et la conception détaillée du prototype réalisé. De plus, on a fait le dimensionnement et la réalisation d'un hacheur commandé par Arduino avec un système MPPT, afin de suivre le point de puissance optimale du module photovoltaïque, pour améliorer le rendement de notre système.

Abstract

During these years, there is an interest for the renewed energy, especially the solar energy. The consolidation of this field with the domain of automobile will create a big revolution in the forum of transports.

This project comprises the realization of a solar vehicle controlled on distance by Bluetooth, with global analyses about the basic function of the solar panel, and a detailed conception about the prototype realized. Besides, the job realized in this project pivots around the optimal use of the solar energy for that reason we worked with the DC-DC converter, that's why a study detailed was necessary of the structure of the converter, which is an intrinsic system depend a lot of parameter.



Liste des abréviations

PV	Photovoltaïque
MPPT	Dispositif de poursuite du point de puissance (Maximum Power Point Tracking)
P&O	Perturbation et Observation
DC	Courant continu (Direct current)
Isat	Le courant de saturation
I_{pv}	Le courant fourni par le panneau photovoltaïque
T	La température
Rs	La résistance série
I_{ph}	Le photo-courant de la cellule
Rsh	La résistance shunt
V_{pv}	La tension aux bornes du panneau photovoltaïque

Liste des figures

Figure 1: Le premier véhicule solaire de l'histoire	15
Figure 2: Le premier véhicule solaire pouvant transporter un être humain	16
Figure 3: Le modèle de voiture solaire la Citicar	16
Figure 4: La structure de la voiture solaire	17
Figure 5: Le panneau photovoltaïque de la voiture solaire	18
Figure 6: Le moteur électrique	18
Figure 7: La motorisation électrique dans la voiture solaire	19
Figure 8: schéma de principe des panneaux photovoltaïques	22
Figure 9: La cellule photovoltaïque	23
Figure 10: Les couches de la cellule photovoltaïque	23
Figure 11: Cellule au silicium mono cristallin	24
Figure 12: Cellule au silicium poly cristallin	25
Figure 13: Cellule au silicium amorphe	25
Figure 14: Association des cellules en série	26
Figure 15: Association des cellules en parallèle	26
Figure 16: Association mixte des cellules en série-parallèle	27
Figure 17: La diode anti-parallèle (by-pass)	28
Figure 18: La diode anti-retour	29
Figure 19: La constitution du champ photovoltaïque	29
Figure 20: Les étapes de construction des panneaux photovoltaïques	30
Figure 21: Constitution de l'atome	32
Figure 22: Le dopage du silicium	33
Figure 23: Schéma de la cellule photovoltaïque	34
Figure 24: Simulation de la cellule photovoltaïque dans Proteus	34
Figure 25: la courbe $I = f(V)$ d'un module photovoltaïque typique	35
Figure 26: L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I = f(V)$	36
Figure 27: L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P = f(V)$	36
Figure 28: L'influence de la température sur la caractéristique $I = f(V)$	37
Figure 29: L'influence de la température sur la caractéristique $P = f(V)$	37
Figure 30: Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec MPPT	38
Figure 31: Bête à cornes de la voiture solaire	44
Figure 32: Diagramme pieuvre de la voiture solaire	45
Figure 33: S.A.D.T de la voiture solaire	46
Figure 34: Architecture du corps de la voiture solaire	48



Figure 35: L'orientation idéale du panneau solaire	49
Figure 36: L'emplacement du panneau sur la voiture	49
Figure 37: Structure technique de la voiture solaire	50
Figure 38: Schéma de la commande par Bluetooth par application Fritzing	51
Figure 39: Programme de la commande par Bluetooth	53
Figure 40: Logo d'Appinventor	53
Figure 41: Les applications de la commande Bluetooth	54
Figure 42 : Application bluetooth	54
Figure 43: Symbole hacheur	55
Figure 44: Schéma d'un hacheur série (Buck)	55
Figure 45: Schéma d'un hacheur parallèle (Boost)	55
Figure 46: Dimensionnement de l'inductance	57
Figure 47: Caractéristique de la puissance d'un module PV	59
Figure 48: Algorithme P&O de la commande MPPT	60
Figure 49: Simulation d'un hacheur élévateur commandé par MPPT dans Proteus	61
Figure 50: Diviseur de tension	61
Figure 51: Capteur de courant	62
Figure 52: Panneau photovoltaïque utilisé	63
Figure 53: Motoréducteur	64
Figure 54: Pilote moteur L298N	65
Figure 55: Batterie Li-Ion	65
Figure 56: Carte Arduino UNO R3	66
Figure 57: Module Bluetooth HC-06	67

Liste des tableaux

<i>Tableau 1: Les caractéristiques des types des panneaux photovoltaïques</i>	<i>31</i>
<i>Tableau 2: Les défauts et les conséquences des panneaux photovoltaïques</i>	<i>40</i>
<i>Tableau 3: Table du diagramme pieuvre de la voiture solaire</i>	<i>45</i>

Sommaire

Dédicace

Remerciement

Résumé du rapport

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Sommaire

Introduction générale

Partie 1 : Généralités sur les Véhicules Solaires

Introduction	11
I. L'Energie solaire	11
II. La voiture solaire	14
Conclusion	20

Partie 2 : Les panneaux photovoltaïques

I. Introduction	22
II. La composition des panneaux photovoltaïques	22
IV. Caractéristiques de la cellule photovoltaïque	33
V. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque	38
VI. Evolution et avenir du photovoltaïque	39
VII. La Maintenance des panneaux photovoltaïques	40
Conclusion	41

Partie 3 : La conception d'une voiture solaire

Introduction	43
---------------------	-----------



I. Description du projet	43
II. Structure de la voiture solaire	47
III. La commande par Bluetooth	50
IV. Hacheur	55
V. Choix des composants de la voiture	62
Conclusion	67

Conclusion Générale

Bibliographie

Introduction générale

De nos jours, ils existent plusieurs sources d'énergies ; et pour le domaine d'automobiles, les carburants restent les premiers et les principales sources. D'une autre part, au courant du développement technologique, on peut compter sur l'électricité pour se déplacer avec les voitures d'une façon économique et sans import environnemental, mais ça reste une solution qui n'est pas trop efficace pour plusieurs raisons. Et pour faire face la plupart des problèmes de ces voitures électriques, on peut compter sur l'énergie solaire comme source principale d'énergie, et qui sera converti en électricité pour alimenter la voiture.

Le projet est alors c'est construire un prototype d'une voiture solaire, de faire l'étude théorique globale de cette voiture, sa conception et son fonctionnement, ainsi le fonctionnement et l'étude de tous les composants de cette dernière. De plus, ce n'est pas une voiture solaire vierge, c'est une voiture programmée pour être commandée à distance par Bluetooth.

Durant ce projet, notre objectif principal était d'apprendre et de savoir la méthode de chercher et réaliser notre propre projet, et pour s'assurer que la conception des voitures solaires est maitrisable. Ainsi de tester nos capacités et notre sens de défi.

Bonne lecture.



Partie 1

Généralités sur les Véhicules Solaires

Partie 1

Généralités sur les Véhicules Solaires

Introduction

Depuis son apparition, l'automobile devient de plus en plus une nécessité principale à l'être humain qui lui permet de faciliter la vie et de minimiser le temps de déplacement, mais dans les dernières années le secteur automobile pose certains problèmes, comme les émissions des gaz à effet de serre, la dépendance au pétrole qui continue à se raréfier, et beaucoup d'autres problèmes. Ce qui impose une orientation vers des nouvelles technologies pour surmonter ces défis.

Dans les décennies à venir, les véhicules électriques seront la solution qui pourrait jouer un rôle important dans l'évolution vers des moyens transports durables. Si ces véhicules fonctionnent avec une énergie renouvelable, ils pourraient contribuer à une réduction significative des émissions de CO₂ et à améliorer localement la qualité de l'air.

La lumière du Soleil peut être utilisée pour produire de l'électricité. On utilise pour cela des panneaux composés de cellules électroniques qui réagissent aux rayons du Soleil. On parle alors d'énergie solaire photovoltaïque. Ces installations sont de plus en plus répandues dans le monde.

I. L'Énergie solaire

Le développement de l'exploitation des énergies renouvelables a connu une forte croissance ces dernières années. La production d'électricité par des sources d'énergie renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant les normes écologiques de l'énergie. Le caractère renouvelable d'une énergie dépend de la vitesse à laquelle la source se régénère, mais aussi de la vitesse à laquelle elle est consommée.

1. Les types d'utilisation d'énergie solaire

L'énergie du soleil peut être utilisée essentiellement de trois façons, quand on parle alors d'énergie solaire, il convient donc de faire la différence entre :

a. Energie photovoltaïque

Technologie utilisant l'énergie du soleil pour fournir l'électricité alimentant appareils électriques et éclairage. Un système photovoltaïque produit de l'électricité grâce à la lumière du jour et non pas uniquement grâce à la lumière du soleil.

b. Energie solaire thermique

Technologie utilisant l'énergie du soleil pour fournir de l'eau chaude ou du chauffage aux maisons et aux piscines.

c. Chaleur passive

Il s'agit de la chaleur que nous recevons naturellement du soleil. Cet élément peut être pris en compte dans la conception des bâtiments afin de réduire les besoins en chauffage.

2. Le procédé photovoltaïque

Le mot (Photovoltaïque) est la combinaison de deux mots : (photo), mot d'origine grecque qui signifie lumière ; et (voltaïque), qui vient de (volt) et représente l'unité utilisée pour mesurer le potentiel électrique.

Les systèmes photovoltaïques utilisent des cellules pour convertir le rayonnement solaire en électricité. Une cellule photovoltaïque est constituée d'une ou deux couches de matériau semi-conducteur. Quand la lumière atteint la cellule, cela crée un champ électrique à travers les couches, créant ainsi un flux électrique. Plus la lumière est intense, plus le flux électrique est important.

Pour fonctionner, un système photovoltaïque n'a donc pas besoin d'une lumière du soleil éclatante. Il génère aussi de l'électricité par temps nuageux.

3. Histoire et début de l'énergie solaire

Il y a très longtemps que l'Humanité a compris comment se servir du Soleil pour allumer un feu. Grâce à des miroirs, on peut concentrer en un point la puissance des rayons solaires. La chaleur devient alors si intense sur ce point que le feu démarre. C'est comme cela que, dans l'Antiquité, les Grecs allumaient la flamme olympique.



L'effet photovoltaïque a été découvert pour la première fois en 1839 par Alexandre Edmond Becquerel, un physicien français. Edmond a constaté que certains matériaux pouvaient produire de petites quantités d'électricité quand ils étaient exposés à la lumière. Albert Einstein se pencha sur ce travail, en 1905, il publie un papier sur le potentiel de production d'électricité à partir de la lumière du soleil. Ce document explore l'effet photovoltaïque, technologie sur laquelle est fondé le panneau solaire.

En 1913, William Coblentz a posé le premier brevet pour une cellule solaire, mais il ne pourra jamais la faire fonctionner. En 1916, Robert Millikan a été le premier à produire de l'électricité avec une cellule solaire. Pendant les quarante années suivantes, personne ne fit beaucoup de progrès en énergie solaire car les cellules photovoltaïques avaient un trop mauvais rendement pour transformer la lumière du soleil en énergie.

Le premier panneau solaire a été construit en 1954 par les laboratoires Bell. Il a été appelé batterie solaire mais c'était juste un effet d'annonce car il était trop coûteux à produire. Ceux sont les satellites qui ont réellement fait avancer l'énergie solaire dans les années 1960 lors la course à l'espace. Les satellites ont besoin d'une source d'énergie fiable. L'énergie solaire est parfaite car c'est une source d'énergie constante pour les satellites en orbite. L'industrie spatiale mis beaucoup de fonds dans le développement des panneaux solaires. C'était la première utilisation importante de la technologie solaire.

Grâce à l'espace, les panneaux solaires ont prouvé leur fiabilité. Le coût de production des cellules solaires a également diminué. L'énergie solaire a eu un second élan au cours de la crise de l'énergie dans les années 1970. Quand le prix du pétrole a augmenté de façon spectaculaire, les panneaux solaires photovoltaïques ont commencé à être utilisés pour la première fois dans les maisons. Depuis les panneaux solaires se sont développés lentement. Pendant longtemps, ils ont été considérés comme des sources d'énergies alternatives. L'énergie solaire est de nouveau en pleine essor car on prévoit une pénurie de pétrole prochaine, on se préoccupe du réchauffement de la planète et les prix de l'énergie n'ont jamais été aussi hauts.

L'énergie solaire devient une priorité pour de plus en plus de pays. Des centrales solaires sont en cours de construction dans le monde entier. Les entreprises investissent également. Les entreprises d'électricités et les gouvernements ont offert des subventions et des réductions pour encourager les propriétaires à investir dans les panneaux solaires pour leur maison.



De nouveaux types de panneaux solaires ont été développés: panneau solaire très fins (4 mm d'épaisseur) et flexibles, des peintures solaires. L'objectif est de réduire très fortement le coût de l'énergie solaire. L'énergie solaire est l'énergie du futur.

4. Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire

Comme tout procédé dans le monde, l'énergie solaire a aussi des inconvénients et des avantages :

a. Avantages de l'énergie solaire

- Énergie renouvelable
- Disponible toute l'année
- Facile à installer
- Technologie qui évolue rapidement

b. Inconvénients de l'énergie solaire

- Fabrication et recyclage des panneaux peu écologiques, car ça nécessite de l'énergie
- Production qui dépend des conditions d'ensoleillement
- Durée de vie limitée (env. 20 ans avec un rendement maximum)
- Rendement assez faible (15 %)

II. La voiture solaire

La voiture solaire est un véhicule alimenté par des cellules photovoltaïques utilisée pour évoluer sur le réseau routier, il s'agit d'une innovation technologique qui permettra dans un futur proche de se déplacer en récupérant et en stockant l'énergie solaire pour la transformer en énergie électrique.

Les voitures solaires combinent des technologies typiquement utilisées dans les domaines de l'aérospatiale, des énergies alternatives et de la construction automobile. Le design d'un véhicule solaire est particulièrement contraint par la taille des capteurs solaires à cause de la quantité d'énergie dont la voiture a besoin. La plupart des véhicules solaires sont des prototypes expérimentaux construits dans le but de participer à des courses de voitures solaires.

1. L'évolution des voitures solaires

Le premier véhicule solaire de l'histoire (la Sunmobile) est un modèle réduit de voiture inventé par William Cobb de General Motors. Elle est présentée la première fois à Chicago le 31 août 1955. Cette miniature est dotée de 12 cellules photovoltaïques en sélénium et d'un petit

moteur électrique Pooley qui actionne une poulie faisant tourner les roue arrière, et elle est fabriquée en bois de balsa, mesure moins de 40 cm de longueur.

Elle prouve néanmoins pour la première fois que l'énergie solaire est capable de faire se mouvoir un véhicule.

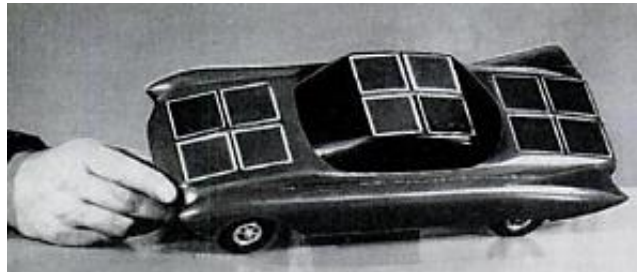


Figure 1: Le premier véhicule solaire de l'histoire

Après 5 ans de travail en Californie, le premier véhicule solaire pouvant transporté un être humain est mis au point et présenté en 1960 à Rome par le physicien et chimiste américain Charles Escoffery. Il s'agit d'une ancienne Baker, une voiture électrique datant de 1912, équipée sur son toit de 2,42 m² de panneaux solaires amovibles comportant 10 640 cellules. Cette installation a une puissance de 200 W avec des conditions d'ensoleillement optimales mais, pratiquement, cette puissance dépasse rarement les 100 W pour un rendement des cellules atteignant seulement 5 %.

Partant d'une charge complète d'électricité, elle peut rouler durant 3 heures à une vitesse maximum de 32 km/h. Cette voiture solaire est présentée dans le monde entier par son concepteur afin de démontrer que l'énergie solaire permet une mobilité propre et économique.



Figure 2: Le premier véhicule solaire pouvant transporter un être humain

En 1980, le département d'ingénierie de l'Université de Tel-Aviv en Israël met au point, sous la direction d'Arye Braunstein, un modèle de voiture solaire, la Citicar.

Le véhicule est composé d'un châssis de métal et possède des panneaux solaires sur son toit et son capot. Ceux-ci comprennent 432 cellules produisant 400 W de puissance de crête. La Citicar possède 8 batteries de 6 V chacune pour stocker l'énergie photovoltaïque. La Citicar pèse un peu moins de 600 kg, peut atteindre une vitesse de 65 km/h (non officialisé) et a une autonomie de 80 km.



Figure 3: Le modèle de voiture solaire la Citicar

2. Le fonctionnement

Depuis l'apparition des cellules photovoltaïques, les professionnels de l'automobile souhaitent créer une voiture entièrement propulsée à l'aide de l'énergie solaire. L'intérêt de cette énergie est de profiter de la lumière solaire pour la transformer en énergie électrique. Pour faire cette modification on utilise des cellules photovoltaïques (panneau solaires) qui seront chargé de transformer les photons de lumière en électron (électricité).

Une voiture que l'on qualifie de solaire fonctionne avant tout grâce au rendement des cellules photovoltaïques installées sur sa structure et à la capacité de stockage d'énergie de ses batteries.

Donc, pour faire fonctionner les voitures solaires, il faut que la plus grande surface possible soit recouverte possible soit recouverte de panneaux solaires. L'excès d'électrons alimente ensuite des batteries à chargement rapides, permettant au moteur électrique de fonctionner.

Comparées à la technologie des moteurs à combustion interne, le fonctionnement des voitures à partir d'énergie solaire offre de multiples avantages tels que :

- le développement d'une mobilité durable.
- la réduction ou la suppression de la pollution de l'air et réduire les nuisances sonores.

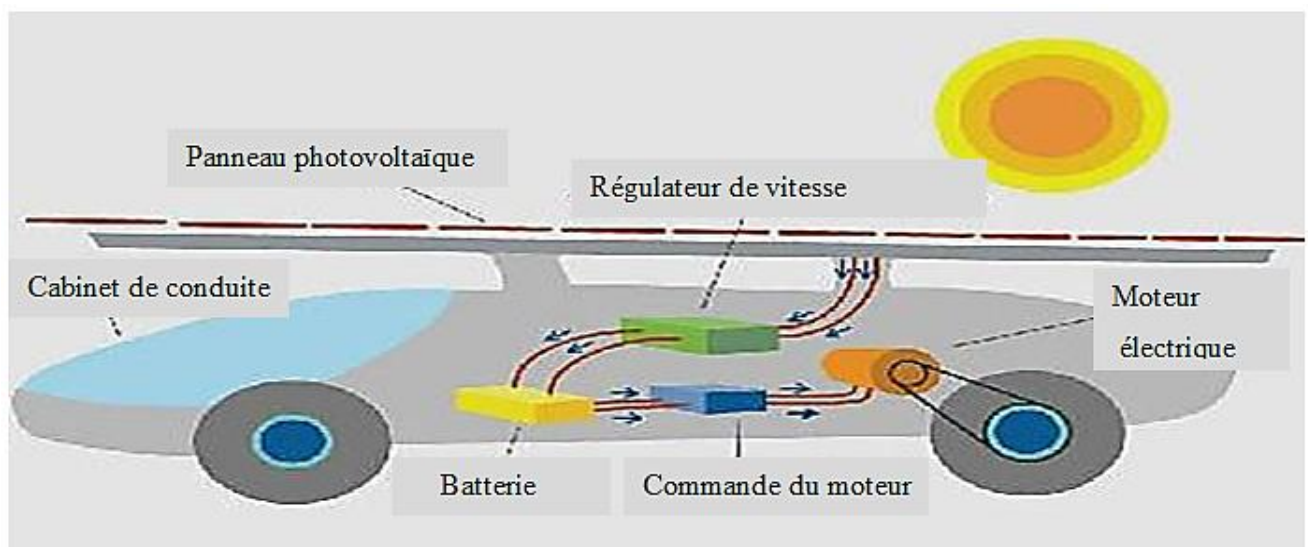


Figure 4: La structure de la voiture solaire

3. La composition

Les voitures solaires électriques contiennent plusieurs composants qui sont totalement différents aux composants des véhicules thermiques, une voiture solaire électrique est composée essentiellement de trois éléments d'alimentation :

a. Panneau photovoltaïque

Les panneaux solaires sont destinés à récupérer l'énergie du rayonnement solaire pour la transformer en électricité.

Dans une voiture solaire, il est destiné principalement au chargement des batteries. Ce qui nécessite que le panneau solaire doit être puissant, flexible et d'un type convenable aux voitures solaires (rendement, résistance à l'environnement). En effet, il doit être monté dans

un emplacement idéal pour capter le maximum d'énergie solaire, généralement, il est mis sur le toit ou le capot de la voiture.



Figure 5: Le panneau photovoltaïque de la voiture solaire

b. Moteur électrique

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

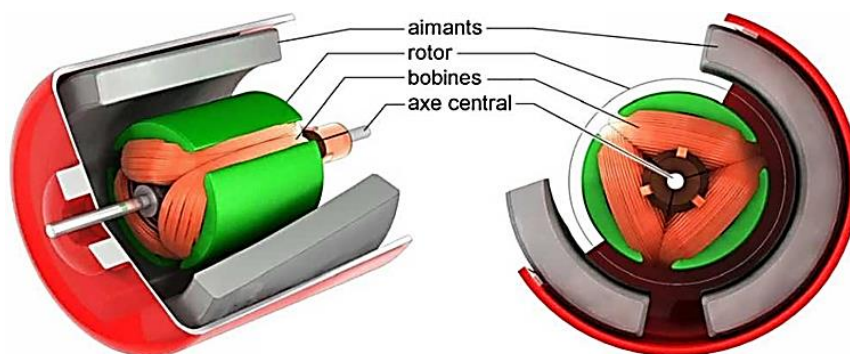


Figure 6: Le moteur électrique

La motorisation électrique peut être implantée sur l'essieu avant, l'essieu arrière ou les deux. Elle est alors composée d'un moteur équipé d'un réducteur, généralement épicycloïdal, accouplé à un différentiel. L'ensemble est relié aux roues par l'intermédiaire de transmissions.

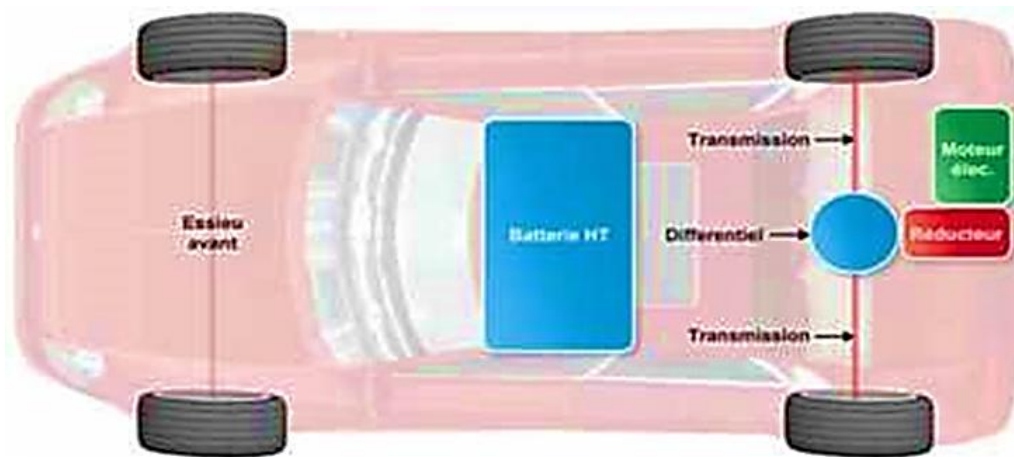


Figure 7: La motorisation électrique dans la voiture solaire

c. Batterie

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

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

Il existe plusieurs types de batteries utilisées dans le secteur automobile, comme la batterie plomb (Pb), la batterie cadmium nickel (Cd-Ni), la batterie nickel métal hydrure (Ni-Mh), la batterie lithium. Mais la batterie lithium reste le meilleur choix car les accumulateurs lithium offrent aujourd'hui les plus importantes densités d'énergies massiques et volumiques (environ 160 Wh/kg et 400 Wh/l). Ils sont aussi les plus délicats dans leur utilisation, et un BMS (Battery Management System) est indispensable pour s'assurer de la meilleure longévité.

4. Les avantages et inconvénients de la voiture solaire

a. Les Avantages

Les avantages de ces véhicules ne sont autres que de pouvoir se déplacer sans émettre une once de pollution. En effet, le véhicule s'auto-suffit. Lors des journées ensoleillées, les capteurs jouent pleinement leur rôle, permettant ainsi d'actionner le moteur. Lorsque les

nuages arrivent, un système de batterie, dont la recharge est assurée par les cellules photovoltaïques elles-mêmes, ou bien par secteur comme les véhicules électriques actuels, prend le relais afin d'éviter la panne.

Question recyclage, une fois les panneaux trop usés, le silicium qui constitue les cellules photovoltaïques est recyclable. Le coût de fabrication de ces cellules devrait donc très vite chuter.

b. Les Inconvénients

Il y a cependant de nombreux désavantages :

Les batteries pour les véhicules électriques permettent de limiter les émanations de pollution durant la circulation, mais la production de ces batteries est elle-même polluante, d'autant que si les panneaux se recyclent, les batteries ne présentent pour l'instant aucune méthode de recyclage adaptée.

Question autonomie, les prototypes actuels ne sont pas des exemples d'efficacité. La batterie n'offre qu'une heure d'autonomie à une vitesse moyenne de 50 km/h, ce n'est pas des plus pratiques pour partir en vacances... Sans oublier que la voiture se doit d'être la plus légère possible : plus la masse du véhicule augmente, plus il demande d'énergie, et donc moins il circule longtemps.

D'autant que comme les produits innovants ont un coût souvent élevé, le prix de ces voitures solaires devrait être élevé.

Conclusion

En bref, on peut affirmer qu'une voiture solaire n'est autre qu'un véhicule électrique dotée de moyens pour capter la lumière émise par le soleil, en la transformant en énergie électrique pour son fonctionnement.

Partie 2

Les panneaux photovoltaïques

Partie 2

Les panneaux photovoltaïques

I. Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque, l'effet photovoltaïque a été découvert en 1839 par le physicien français Becquerel.

Le but des panneaux solaires c'est de convertir le rayonnement solaire en électricité à l'aide d'une cellule photovoltaïque, elle est composée de matériaux semi-conducteurs, qui sont capable de transformer l'énergie fournit par le soleil en charge électrique.

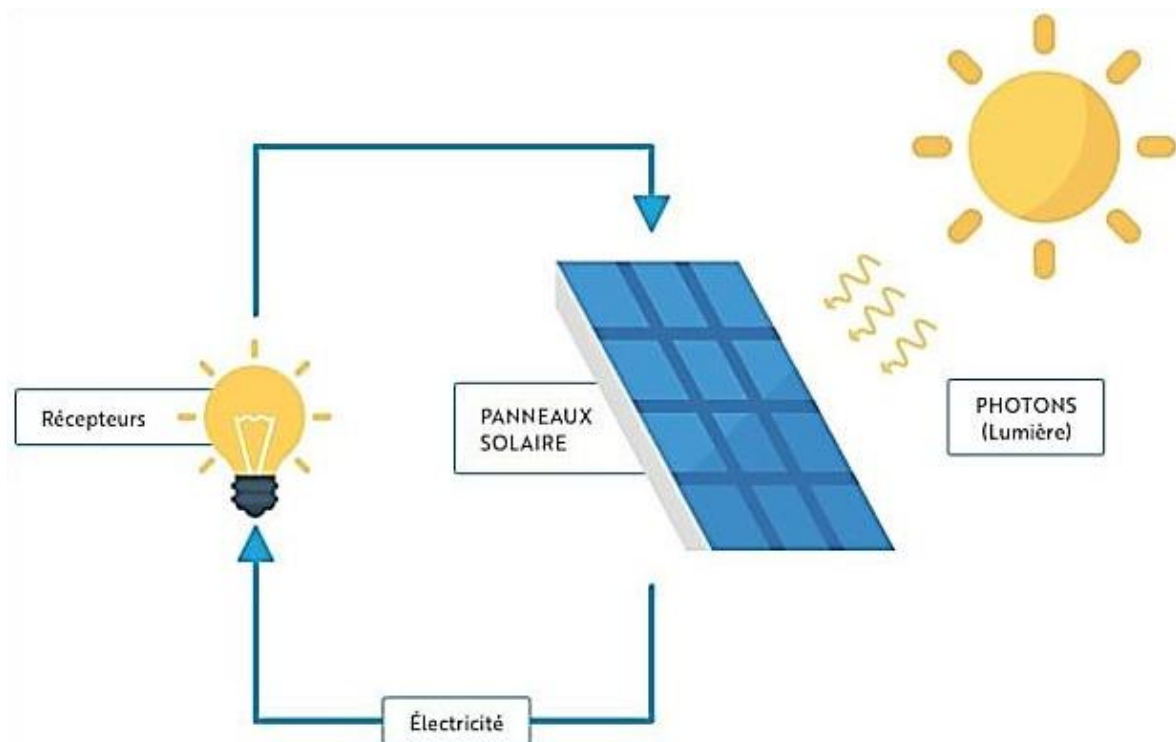


Figure 8: schéma de principe des panneaux photovoltaïques

II. La composition des panneaux photovoltaïques

1. La cellule photovoltaïque

On appelle cellule solaire un convertisseur qui permet la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. La cellule photovoltaïque constitue l'élément de base des panneaux



solaires photovoltaïques. Il s'agit d'un dispositif semi-conducteur à base de silicium délivrant une tension de l'ordre de 0,5 à 0,6 V.

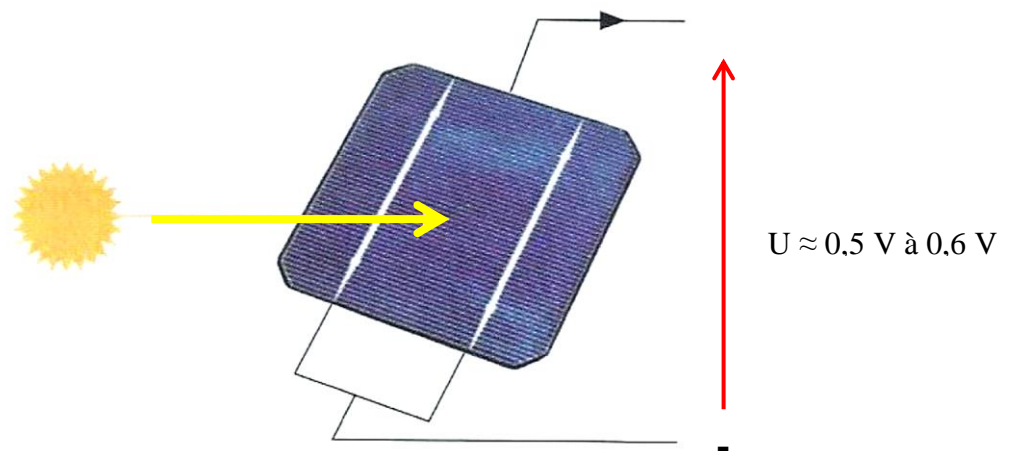


Figure 9: La cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est fabriquée à partir de deux couches de silicium (matériau semi-conducteur):

- Une couche dopée avec du bore qui possède moins d'électrons que le silicium, cette zone est donc dopée positivement (zone P),
- Une couche dopée avec du phosphore qui possède plus d'électrons que le silicium, cette zone est donc dopée négativement (zone N).

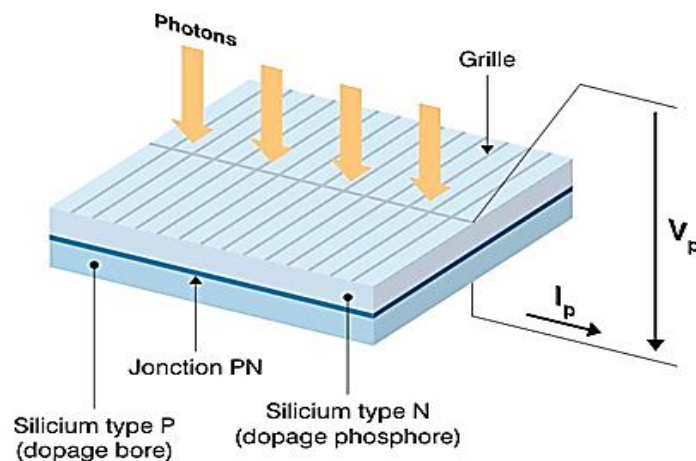


Figure 10: Les couches de la cellule photovoltaïque

Lorsqu'un photon de la lumière arrive, son énergie crée une rupture entre un atome de silicium et un électron, modifiant les charges électriques. Les atomes, chargés positivement, vont alors dans la zone P et les électrons, chargés négativement, dans la zone N. Une

différence de potentiel électrique, c'est-à-dire une tension électrique, est ainsi créée. C'est ce qu'on appelle l'effet photovoltaïque.

Les cellules solaires sont recouvertes d'une couche antireflet qui protège la cellule et réduit les pertes par réflexion. C'est une couche qui donne aux cellules solaires leur aspect bleu foncé.

2. Les types des cellules photovoltaïque

Il existe trois grands types des cellules de silicium : mono cristallin, poly cristallin et amorphe.

a. Cellule au silicium mono cristallin

Pour ce genre d'applications technologiques, le silicium pur est obtenu à partir de la silice de quartz ou de sable par transformation chimique métallurgique. Le silicium mono cristallin a un rendement électrique et une durée de vie de l'ordre de deux fois celle du silicium amorphe, mais il est nettement plus cher.

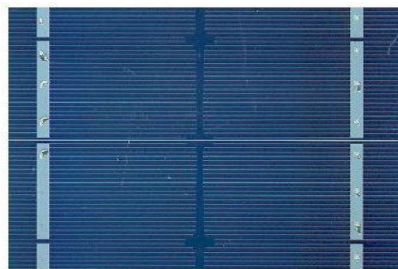


Figure 11: Cellule au silicium mono cristallin

b. Cellule au silicium poly cristallin

Le silicium poly-cristallin est un matériau composé de cristaux juxtaposés obtenus par moulage. Ce matériau est moins coûteux que le mono cristallin. Les cellules carrées ou rectangulaires sont faciles à utiliser.



Figure 12: Cellule au silicium poly cristallin

c. Cellule au silicium amorphe

Le silicium absorbe le rayonnement solaire jusqu'à 100 fois mieux qu'en état cristallin ; les cellules sont constituées par des couches très minces.

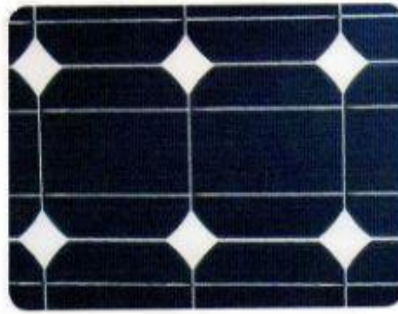


Figure 13: Cellule au silicium amorphe

3. Module photovoltaïque

Les caractéristiques électriques d'une seule cellule sont généralement insuffisantes pour alimenter les équipements électriques. Il faut associer les cellules en série pour obtenir une tension plus importante, ou en parallèle pour augmenter le courant électrique.

Notant que la puissance d'un panneau solaire est fonction de sa surface, c'est à dire du nombre de cellules photovoltaïques.

La puissance crête d'une installation photovoltaïque est la puissance maximale délivrée par un module dans les conditions optimales (orientation, inclinaison, ensoleillement,...), elle s'exprime en Watt crête (Wc). En première approximation, on estime qu'un module de 1 m² produit 100 Wc.

a. Association des cellules en série

Lorsque l'on associe les cellules PV en série, les tensions de ces cellules s'additionnent et le courant généré est le même dans toute la branche. Donc pour augmenter la tension d'utilisation, les cellules PV sont connectées en série. La tension nominale du module est habituellement adaptée à la charge. De plus, la fragilité des cellules au bris et à la corrosion exige une protection envers leur environnement et celles-ci sont généralement encapsulées sous verre ou sous composé plastique.

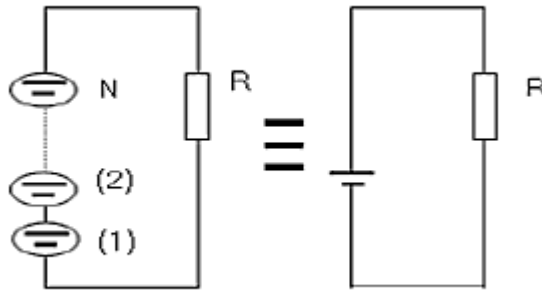


Figure 14: Association des cellules en série

Le courant généré par des cellules PV en série étant le même dans toute la branche et limité par le courant de la cellule la plus faible, on prendra soin de ne connecter en série que des cellules ayant la même densité de courant. C'est pour cela qu'en production, toutes les cellules sont testées et triées en fonction de leur rendement.

Les résistances séries s'ajoutent. L'augmentation de la résistance série induit une perte de puissance, il faut donc faire attention à la résistance d'interconnexion des cellules, dans une association en série. Les résistances parallèles s'ajoutent également.

Le facteur de forme d'un module ne peut en général pas être meilleur que celui de ses cellules constitutives. Comme pour le courant, il se rapproche de celui de la plus mauvaise cellule.

b. Association des cellules en parallèle

Dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules étant soumises à la même tension, les intensités s'additionnent. Donc la tension de chaque cellule doit être identique, et les courants s'ajoutent.

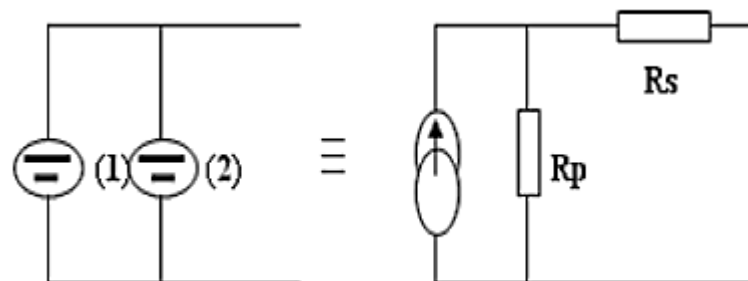


Figure 15: Association des cellules en parallèle

c. Association mixte série-parallèle

Le générateur photovoltaïque est constitué d'un réseau série-parallèle de nombreux modules photovoltaïques regroupés par panneaux photovoltaïques.

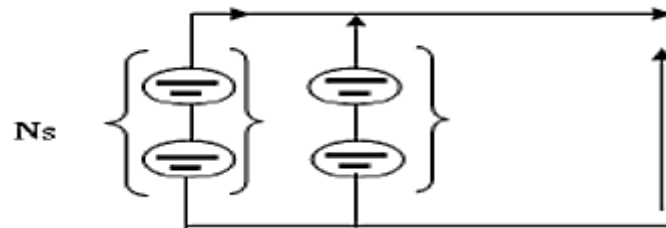


Figure 16: Association mixte des cellules en série-parallèle

Le tout est appelé un module photovoltaïque.

4. La protection par les diodes

a. La diode antiparallèle (by-pass)

La mise en série des cellules peut être dangereuse lorsque l'une d'entre elles se retrouve à l'ombre, elle va s'échauffer et risque de se détruire. En effet, une cellule masquée voit l'intensité qui la traverse diminuer. De ce fait, elle bloque la circulation de l'intensité normale produite par les autres modules. La tension aux bornes de cette cellule masquée augmente, d'où apparition d'une surchauffe. C'est l'effet d'auto polarisation inverse. Une telle cellule est appelée "Hot spot".

Pour protéger les panneaux de ce phénomène de Hot spot, on installe en polarité inverse (antiparallèles) des diodes de by-pass.

Si une cellule ou un groupe de cellule est ombragé, le courant passera par la diode de by-pass et on évite ainsi un échauffement trop intense de ces cellules. Généralement, une diode de by-pass est installée en parallèle à une branche de 18 cellules associées en série. Une cellule ombragée ne peut alors être polarisée que par 17 cellules au maximum. En fonctionnement normal, la diode de by-pass doit pouvoir être polarisée avec une tension inverse égale à la tension de travail du module.

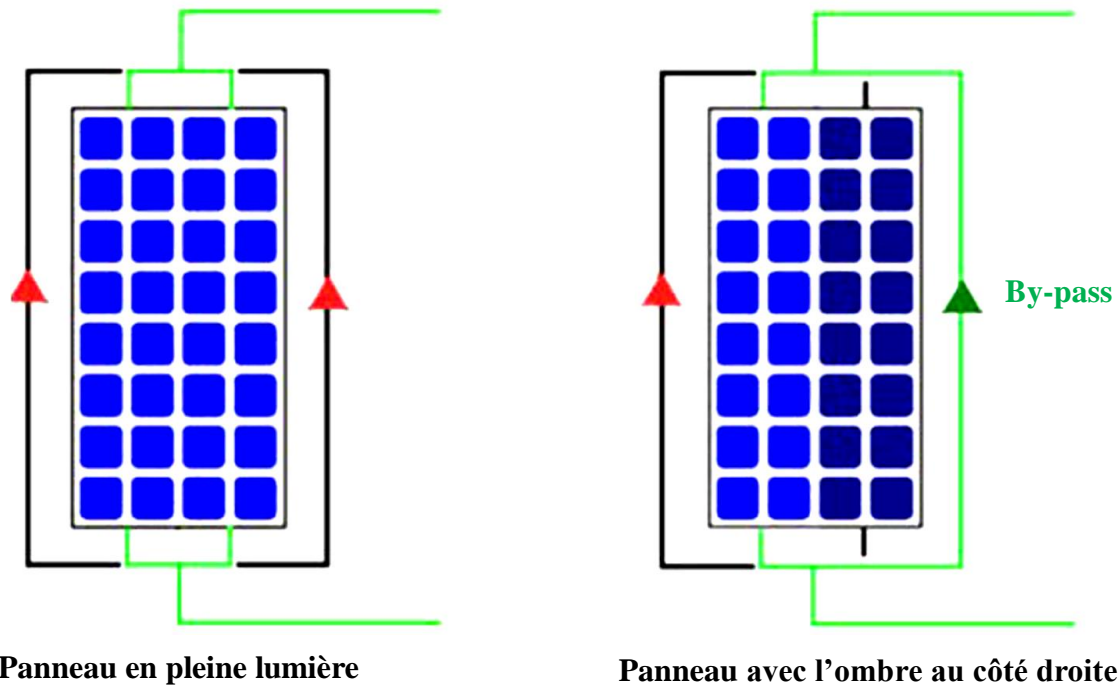


Figure 17: La diode anti-parallèle (by-pass)

Le problème lié à cette méthode de protection, c'est que le groupe de cellules qui est ombragé est court-circuité via la diode de by-pass et ne produit donc plus rien.

b. La diode anti-retour

La diode anti-retour sert lorsque l'on branche les chaînes entre eux. En cas d'ombre sur une chaîne, elle se comporte comme un récepteur et que le courant y circule en sens inverse et l'endommage. C'est pourquoi on met une diode anti retour en série sur chaque chaîne de modules.

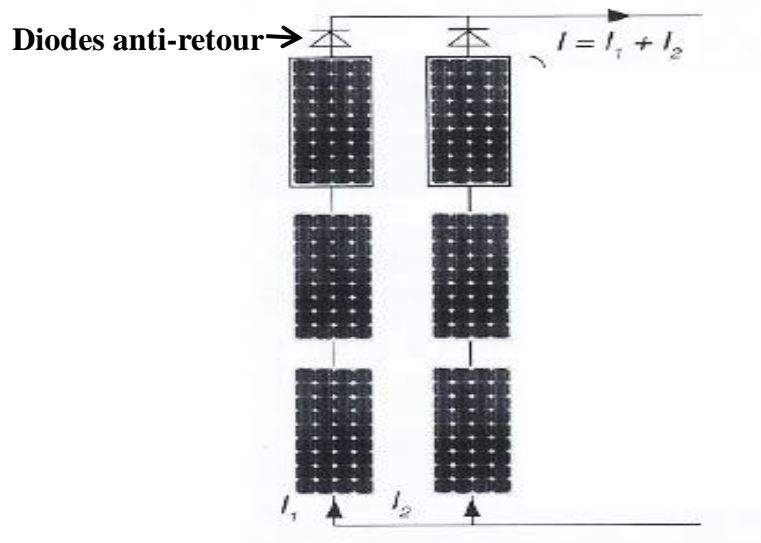


Figure 18: La diode anti-retour

5. Constitution d'un champ photovoltaïque

Afin d'obtenir la tension nécessaire, les panneaux sont connectés en série. Ils forment alors une chaîne de modules ou string.

Les chaînes sont ensuite associées en parallèle et forment un champ photovoltaïque (champ PV).

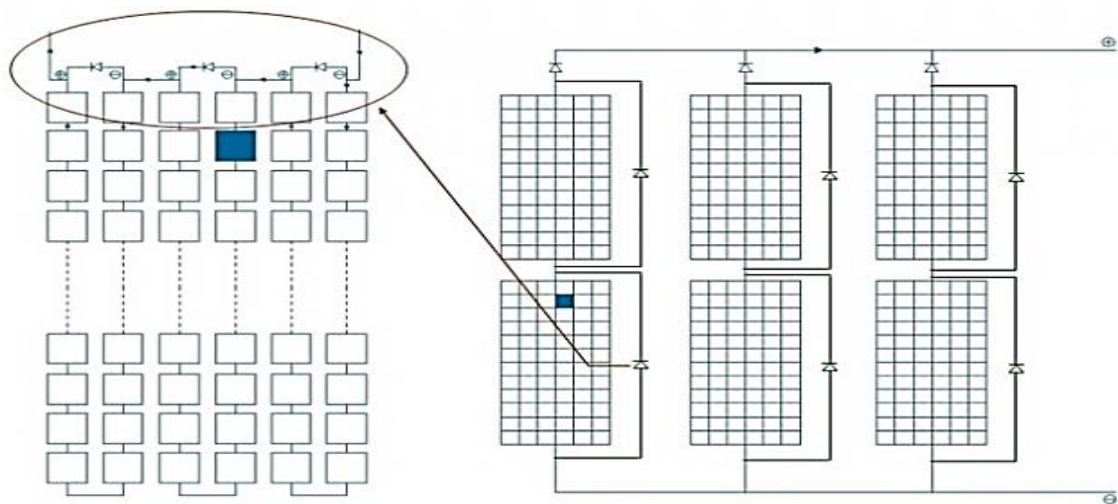


Figure 19: La constitution du champ photovoltaïque

6. Constitution des panneaux

Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques. Il doit être purifié afin d'obtenir un silicium de qualité photovoltaïque.

Il se présente alors sous la forme de barres de section ronde ou carrée appelée lingots.

Les lingots sont ensuite découpés en wafers : fines plaques de quelques centaines de microns d'épaisseur. Ils sont ensuite enrichis en éléments dopants pour obtenir du silicium semi-conducteur de type P ou N.

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

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation.

On estime qu'une cellule photovoltaïque doit fonctionner environ 2 à 3 ans pour produire l'énergie qui a été nécessaire à sa fabrication.



Figure 20: Les étapes de construction des panneaux photovoltaïques

7. Les caractéristiques des types des panneaux photovoltaïques

Types	Mono cristallin	Poly cristallin	Amorphe
Cellule et module			
Caractéristiques	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Très bon rendement: 14 à 20 %. ♦ Durée de vie : importante (30 ans) ♦ Coût de fabrication : élevé. ♦ Puissance : 100 à 150 Wc/m2. ♦ Rendement faible sous un faible éclairement. ♦ perte de rendement avec l'élévation de la température. ♦ Fabrication : élaborés à partir d'un bloc de silicium fondu qui s'est solidifié en formant un seul cristal ♦ Couleur bleue uniforme. 	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Bon rendement : 11 à 15 %. ♦ Durée de vie : importante (30 ans) ♦ Coût de fabrication : meilleur marché que les panneaux monocristallins ♦ Puissance : 100 Wc/m2. ♦ Rendement faible sous un faible éclairement. ♦ perte de rendement avec l'élévation de la température. ♦ Fabrication : élaborés à partir de silicium de qualité électronique qui en se refroidissant forme plusieurs cristaux. ♦ Ces cellules sont bleues, mais non uniforme : on distingue des motifs créés par les différents cristaux. 	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Rendement faible : 5 à 9 %. ♦ Durée de vie : assez importante (20 ans) ♦ Coût de fabrication : peu onéreux par rapport aux autres technologies ♦ Puissance : 50 Wc/m2. ♦ Fonctionnement correct avec un éclairement faible. ♦ Peu sensible aux températures élevées. ♦ Utilisables en panneaux souples. ♦ Surface de panneaux plus importante que pour les autres panneaux au silicium. ♦ Rendement faible en plein soleil. ♦ Performances diminuant avec le temps. ♦ Fabrication : couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide.
Part de marché	43 %	47 %	10 %

Tableau 1: Les caractéristiques des types des panneaux photovoltaïques



III. Fonctionnement des panneaux photovoltaïques

Le secret des panneaux photovoltaïques repose sur le matériau dont ils sont constitués, le Silicium, c'est un élément qu'on retrouve en abondance sur terre puisqu'il est extrait de la silice contenue dans le sable. Le silicium est un semi-conducteur, il est constitué d'atomes, un atome est un noyau autour duquel gravitent des électrons (charges négatives).

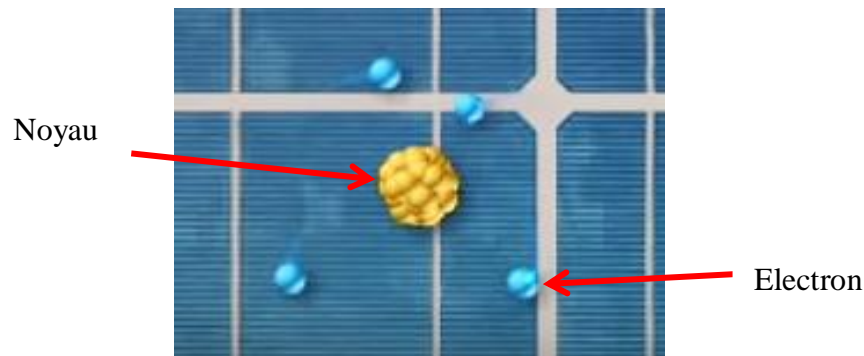


Figure 21: Constitution de l'atome

Quand les panneaux photovoltaïques sont exposés à la lumière, les électrons du silicium s'agitent dans tous les sens et ils passent d'un atome à l'autre, mais cela ne fait pas générer un courant électrique, car le courant électrique c'est une circulation d'électrons dans un sens bien précis.

Pour obtenir ce courant, il faut doper le silicium, c'est une opération qui consiste à obtenir d'un côté un surplus d'électrons, et de l'autre moins d'électron, ce qu'on appelle une tension électrique, et de cette manière les électrons circulent du borne négative (qui contient un surplus d'électrons), vers la borne positive (qui contient moins d'électrons).

Les panneaux photovoltaïques sont constitués de plusieurs couches, pour les dopés on ajoute du phosphore sur la couche exposée à la lumière, c'est un matériau qui possède plus d'électrons que le silicium, et de l'autre côté on ajoute du bore, est c'est un matériau qui contient moins d'électrons que le silicium. On obtient donc une borne négative qui contient un surplus d'électrons grâce au phosphore, et de l'autre une borne positive qui possède moins d'électrons grâce au bore.

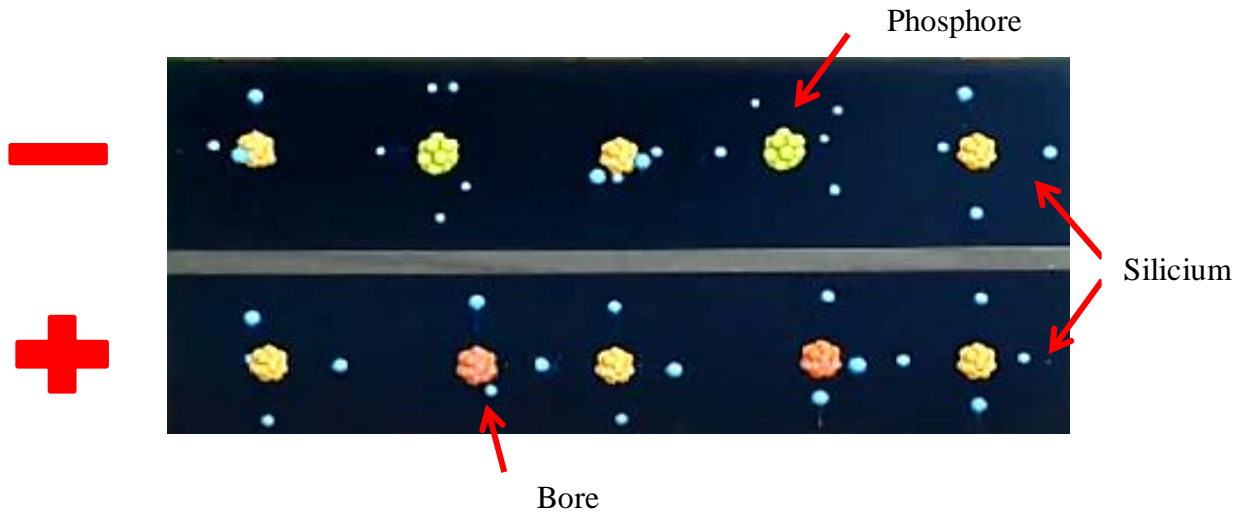


Figure 22: Le dopage du silicium

Il suffit ensuite de relier les deux bornes avec un fil conducteur et une charge, dès que le soleil est présent face au panneau, les électrons de silicium se mettent à circuler en alimentant la charge, ce qui montre qu'on obtient un courant électrique.

L'avantage que c'est inépuisable, dès que le soleil brille, les panneaux photovoltaïques se mettent à produire du courant électrique. La couverture nuageuse diminue le rendement des cellules photovoltaïques, mais malgré la présence des nuages, elles continuent à produire de l'électricité.

Le rendement des panneaux photovoltaïques est de l'ordre de 15%, c'est-à-dire qu'une grande partie de l'énergie est perdue (transformée en chaleur ou réfléchi), donc les constructeurs cherchent toujours à améliorer ce rendement par l'amélioration de la couche anti-reflet ou l'amélioration du dopage de silicium.

IV. Caractéristiques de la cellule photovoltaïque

1. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

Le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque correspond à un générateur de courant monté en parallèle avec une diode, avec deux résistances parasites sont introduites dans le schéma.

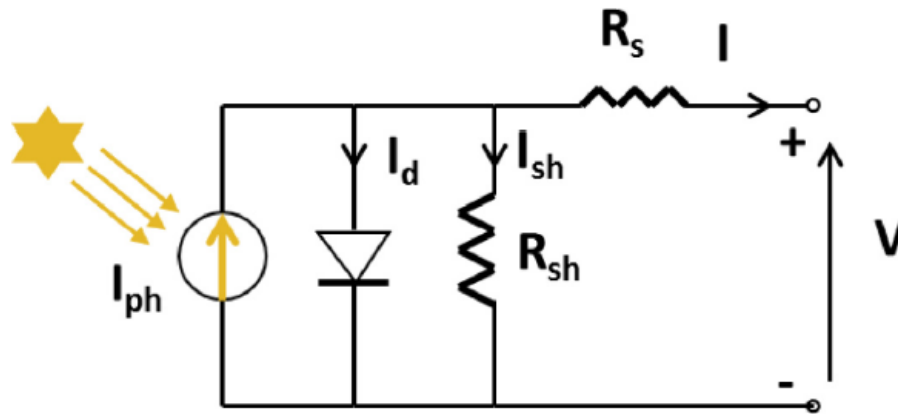


Figure 23: Schéma de la cellule photovoltaïque

Modélisation d'une cellule photovoltaïque

On modélise une cellule photovoltaïque dans Proteus par le schéma suivant :

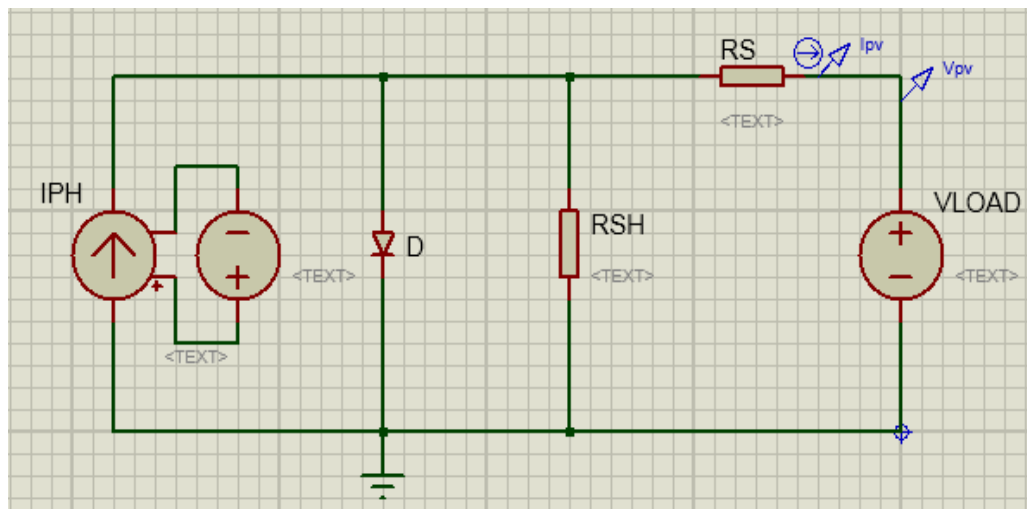


Figure 24: Simulation de la cellule photovoltaïque dans Proteus

La résistance série (\$R_s\$) est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles;

La résistance shunt (\$R_{sh}\$) est due à un courant de fuite au niveau de la jonction; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

Le modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension d'une cellule PV est donné par :

$$I_{PV} = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{e(V_{PV} + (I_{PV} * R_{ser}))}{nKT} \right) - 1 \right] - \frac{V_{PV} + (I_{PV} * R_{ser})}{R_{shu}}$$

Avec :

- I_{sat} est le courant de saturation
- K est la constante de Boltzmann ($1,381 \cdot 10^{-23}$ J/K)
- T est la température effective des cellules en Kelvin(K)
- e est la charge de l'électron ($e=1,6 \cdot 10^{-19}$ C)
- n est le facteur d'idéalité de la jonction ($1 < n < 3$)
- I_{pv} est le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur
- V_{pv} est la tension aux bornes de cette même cellule
- I_{ph} est le photo-courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température ou bien courant de (court-circuit)
- R_{sh} est la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction
- R_s est la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions

2. Caractéristiques Courant-Tension et Puissance-Tension

La courbe suivante représente la courbe $I = f(V)$ d'un module photovoltaïque typique dans des conditions constantes d'irradiation et de température.

L'irradiation standard adoptée pour mesurer la réponse des modules photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000 W/m^2 et une température de 25°C .

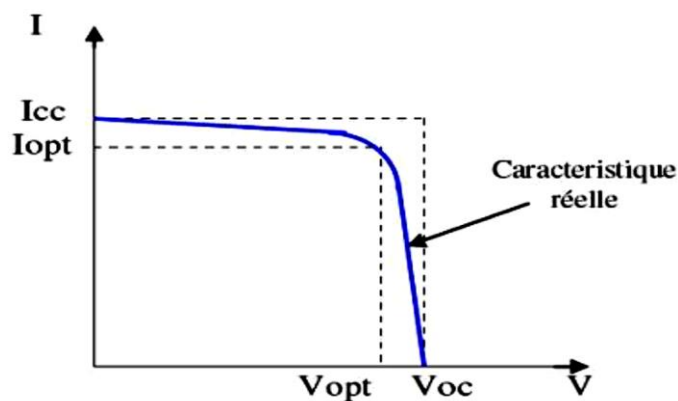


Figure 25: la courbe $I = f(V)$ d'un module photovoltaïque typique

a. Influence de l'éclairement sur les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$

A une température constante, et un éclairement variant, on constate que le courant subit une variation importante, et la tension varie légèrement (le courant est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension est une fonction logarithmique).

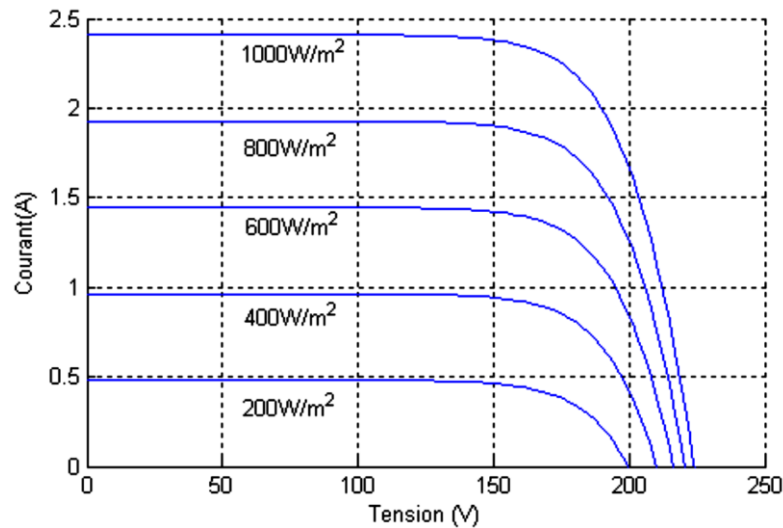


Figure 26: L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$

Et on représente la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P=f(V)$

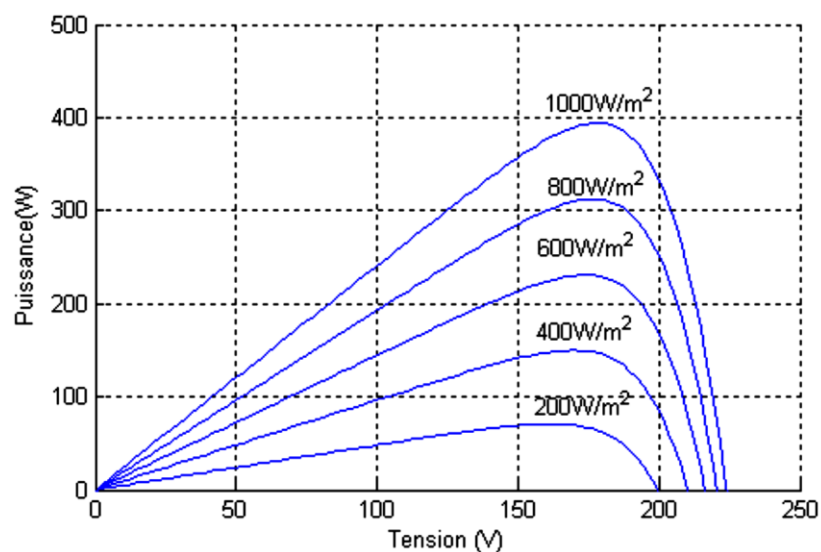


Figure 27: L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P=f(V)$

b. Influence de la température sur les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$

A un éclairement constant, on représente l'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$. Il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'une cellule solaire sur la caractéristique $I=f(V)$. Le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température

augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution.

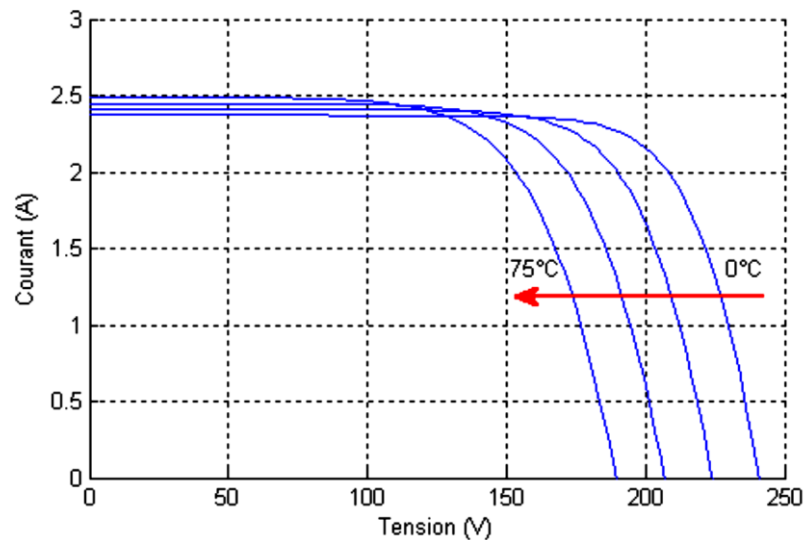


Figure 28: L'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$

La représentation suivante illustre la variation de la puissance en fonction de la tension pour différentes valeurs de la température, ce qui nous permet de déduire l'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$

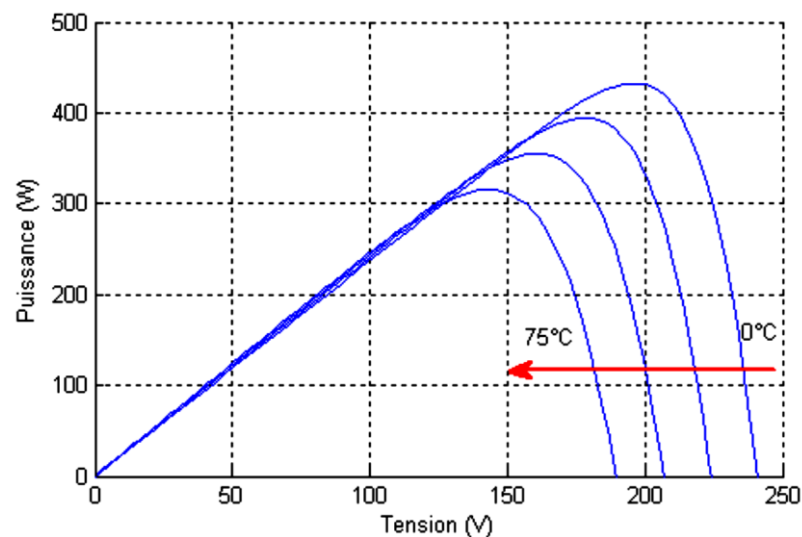


Figure 29: L'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$

3. Interprétations

Les résultats de simulation montrent l'influence des paramètres qui entrent en jeu dans la performance des systèmes solaires de production d'énergie électrique comme l'irradiation solaire, la température, ainsi que la résistance série R_s , la résistance shunt R_{sh} et l'inclinaison du panneau.

D'où la nécessité de l'extraction de la puissance maximale produite du panneau photovoltaïque, par un système de commande MPPT (maximum power point tracking) qui commande un convertisseur DC-DC.

Le schéma suivant montre le diagramme synoptique d'un système photovoltaïque, avec un module MPPT qui a pour entrées la tension et le courant de la sortie du module. Dans la plupart des cas, on fait une maximisation de la puissance fournie par le module solaire.

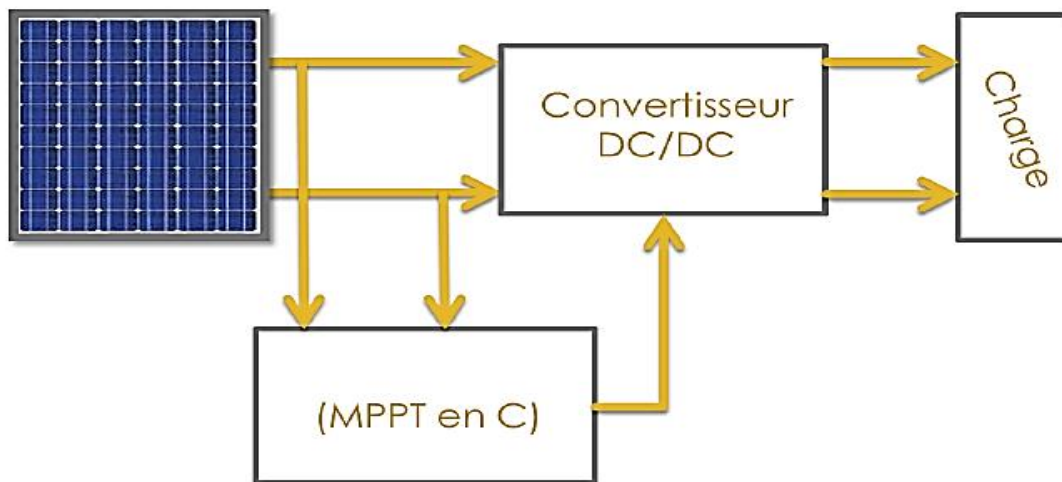


Figure 30: Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec MPPT

Cette méthode est basée sur des algorithmes de recherche itérative pour trouver le point de fonctionnement du module solaire pour que la puissance générée soit maximale sans interruption de fonctionnement du système. Elle n'est pas basée sur des valeurs de références prédéfinies ou à partir des paramètres opérationnels, mais sur la maximisation permanente de la puissance générée par les modules photovoltaïque.

V. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages à savoir :

- ♦ une haute fiabilité.
- ♦ elle ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées, d'où son utilisation sur les engins spatiaux.
- ♦ le caractère modulaire des panneaux photovoltaïque permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissance allant du milliwatt au Mégawatt.

- ♦ le coût de fonctionnement est faible vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni personnel hautement spécialisé.
- ♦ Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

Malgré les avantages qu'elle présente, l'énergie photovoltaïque présente certains inconvénients qui peuvent être résumés comme suit :

- ♦ la fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- ♦ le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium est de 28%).
- ♦ les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.

VI. Evolution et avenir du photovoltaïque

Source d'énergie 100% propre et faible pour des usages très variés, elle figurera à l'avenir parmi les principales sources mondiales. Son handicap majeur reste un coût encore élevé comparée aux sources conventionnelles et aux filières renouvelables. Ce coût diminue de 10% par an, et pour accélérer cette baisse, les autorités nationales et internationales doivent engagés une politique de soutien à long terme de la filière photovoltaïque. C'est précisément l'objectif des programmes lancés depuis quelques années dans plusieurs pays industrialisés.

Dans le Maroc, l'application du PV reste encore modeste. La première utilisation été dans le domaine des télécommunications. Après, certain puits dans les hauts plateaux ont été équipés par des systèmes de pompes PV. A nos jours, quelques dizaines de village saharien jouissent des avantages de cette source d'énergie.

Et après les panneaux solaires, la peinture solaire. Une équipe de chercheurs du Royal Melbourne Institute of Technology (RMIT) en Australie, a développé une peinture capable de générer de l'énergie propre et facile à stocker.



VII. La Maintenance des panneaux photovoltaïques

1. Les problèmes et les défauts des panneaux photovoltaïques

Les panneaux photovoltaïques sont sujets à de nombreux défauts et problèmes qui causent une baisse de productivité à long terme.

On peut présenter les défauts les plus critiques et fréquents pour les panneaux photovoltaïques et leurs conséquences dans le tableau suivant :

Problèmes	Conséquences
Salissure (pollution, sable, neige)	Perte de puissance
Dégradation des modules par vandalisme	Diminution des performances, non fonctionnement de l'installation
Détérioration des joints d'étanchéité	Perte d'étanchéité, détérioration des cellules
Déformation du cadre des modules	Infiltration d'eau
Corrosion du cadre des modules	Perte d'étanchéité, détérioration des cellules
Foudre	Détérioration des modules
Tempête	Module arraché, cassé
Dégradation à cause de la chaleur	Diminution des performances, échauffement, détérioration des joints

Tableau 2: Les défauts et les conséquences des panneaux photovoltaïques

2. La maintenance des panneaux photovoltaïques

Pour éviter les pannes des panneaux photovoltaïques autonomes, on préconise une maintenance préventive pour réduire l'occurrence de ces défaillances selon les opérations suivantes :

- La vérification et le nettoyage des modules mensuellement et après chaque tempête avec une raclette et de l'eau clair
- La vérification des châssis et des fixations mécaniques manuellement et de façon mensuelle, et après chaque tempête
- La vérification des connexions électriques visuellement et de manière mensuelle



- Vérification des caractéristiques (courant, tension) mensuellement à l'aide d'un voltmètre et un ampèremètre

Conclusion

Les systèmes photovoltaïques sont des systèmes maîtrisables, d'où la naissance de l'idée de construire des voitures solaires, tout en installant des panneaux photovoltaïque convenables à des voitures électriques, ce qui va améliorer l'autonomie et diminuer les points faibles de ces voitures.

Partie 3

La Conception De La Voiture Solaire

Partie 3

La conception de la voiture solaire

Introduction

Depuis l'apparition des cellules photovoltaïques, les professionnels de l'automobile souhaitent créer une voiture propulsée à l'aide de l'énergie solaire. Nous allons donc présenter dans ce chapitre, la conception d'une voiture qui exploite le rayonnement solaire pour son autonomie. Cette voiture solaire doit également respecter un cahier des charges, et il faut bien étudier plusieurs phases de conception, afin de commencer sa réalisation.

I. Description du projet

1. Cahier de charges

Créer une voiture solaire commandée à distance par Bluetooth, à base d'Arduino. La seule source d'énergie de la voiture c'est l'énergie solaire, et l'utilisateur pourra contrôler la voiture dans les 4 directions, par une application Android.

2. Les contraintes

❖ Générales

- La voiture devra être à base de composants éprouvés et de conception simple.
- les composants de la voiture devront être achetés neufs et non utilisés auparavant.

❖ Matériels

- Le panneau solaire utilisé devra être du type convenable des voitures solaires
- Les caractéristiques du panneau (puissance, tension) devront être appropriées pour la batterie et les moteurs utilisés.
- Un bon choix de la batterie.
- Le déplacement de la voiture télécommandée se fera exclusivement sur une surface plane, lisse et horizontale.
- La propulsion sera assurée par plusieurs moteurs électriques liés directement avec les roues.



- Deux moteurs seront présents sur la voiture, chaque moteur contrôlera une roue.
- La communication devra être par Bluetooth.
- Le châssis et les roues devront être rigides.
- La voiture devra contenir des indications visuelles (voyants, signaux)

❖ Programmes

- Les programmes devront être le plus clairs et le plus structurés possible.

3. Analyse fonctionnelle

Puisque ce projet concerne la réalisation d'un véhicule solaire, c'est nécessaire de faire une analyse fonctionnelle interne et externe, pour caractériser, ordonner, hiérarchiser et valoriser les fonctions de notre projet.

a. Bête à cornes

L'outil bête à cornes est le mieux adapté pour formaliser l'énoncé du besoin, il répond aux trois questions fondamentaux :

- À qui rend-il service?
- Sur quoi agit-il?
- Dans quel but le produit existe-il?

Donc pour un véhicule solaire, on a :

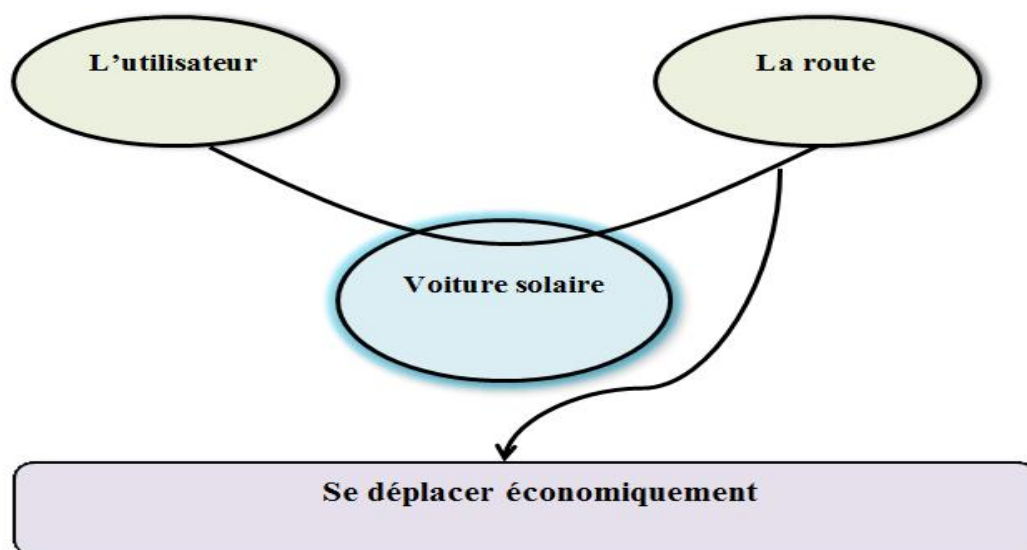


Figure 31: Bête à cornes de la voiture solaire

b. Diagramme pieuvre

Ou diagramme des interactions, il est utilisé pour identifier les fonctions de services d'un produit.

Pour une voiture solaire :

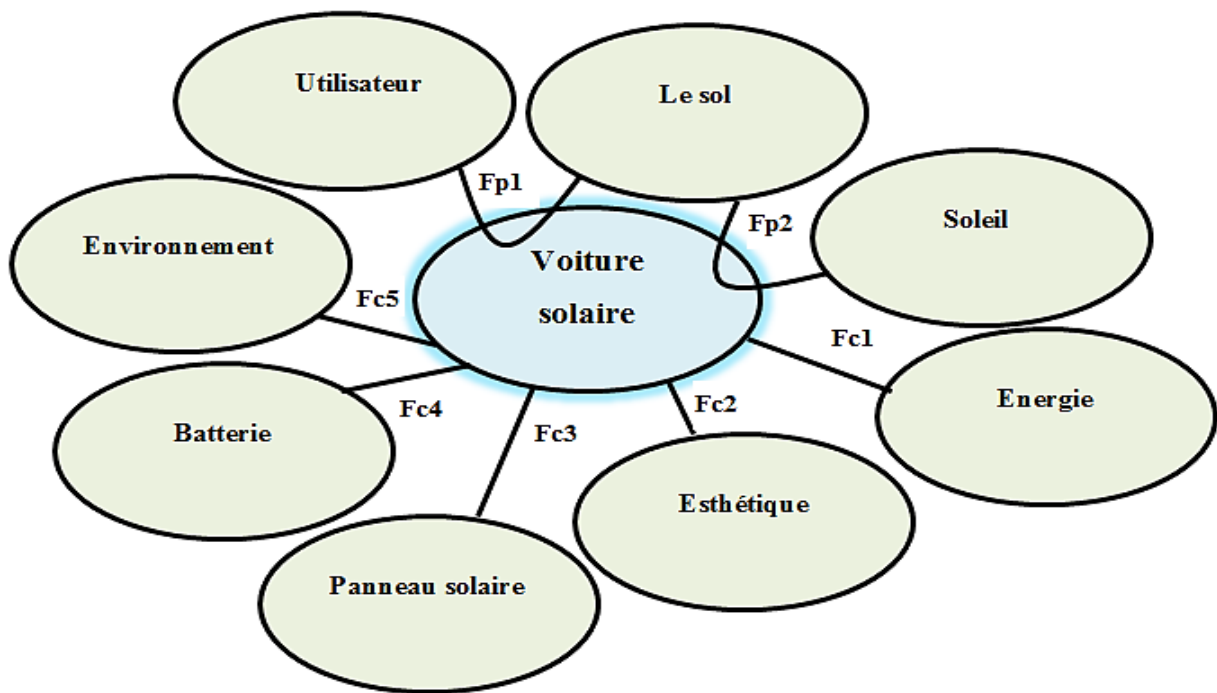


Figure 32: Diagramme pieuvre de la voiture solaire

Fp1	Fonctionner suivant les commandes de l'utilisateur
Fp2	Fonctionner avec l'énergie solaire convertie en énergie électrique
Fc1	Avoir une autonomie suffisante
Fc2	Être esthétique
Fc3	Utiliser un panneau solaire convenable
Fc4	Stocker l'énergie électrique dans des batteries efficaces
Fc5	Respecter l'environnement

Tableau 3: Table du diagramme pieuvre de la voiture solaire

c. S.A.D.T (Technique Structurée d'Analyse et de Modélisation)

La méthode S.A.D.T (Structured Analysis and Design Technics) est une méthode graphique qui part du général pour aller au particulier. Elle permet de décrire des systèmes complexes où coexistent différents flux de matière d'œuvre : systèmes automatisés, asservis ou intégrant l'informatique.

Pour un véhicule solaire :

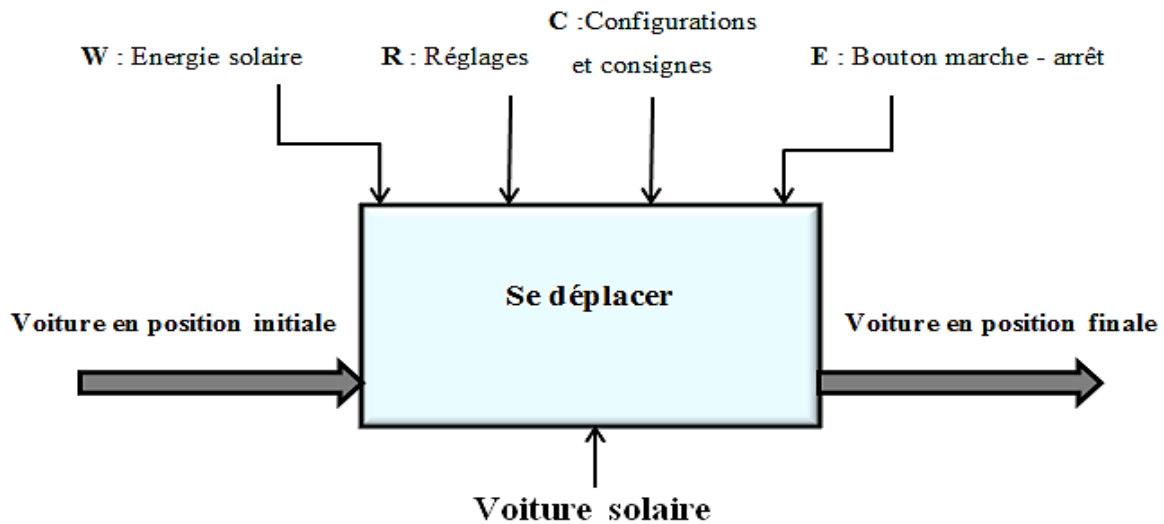


Figure 33: S.A.D.T de la voiture solaire

d. FAST (Function Analysis System Technique)

Un diagramme FAST présente une traduction rigoureuse de chacune des fonctions de service en fonctions techniques, puis matériellement en solutions constructives. Le diagramme FAST se construit de gauche à droite, dans une logique du pourquoi au comment. Grâce à sa culture technique et scientifique, l'ingénieur développe les fonctions de service du produit en fonctions techniques. Il choisit des solutions pour construire finalement le produit.

Pour un prototype de voiture solaire :

https://www.academia.edu/39013192/Voiture_solaire_Solar_Car

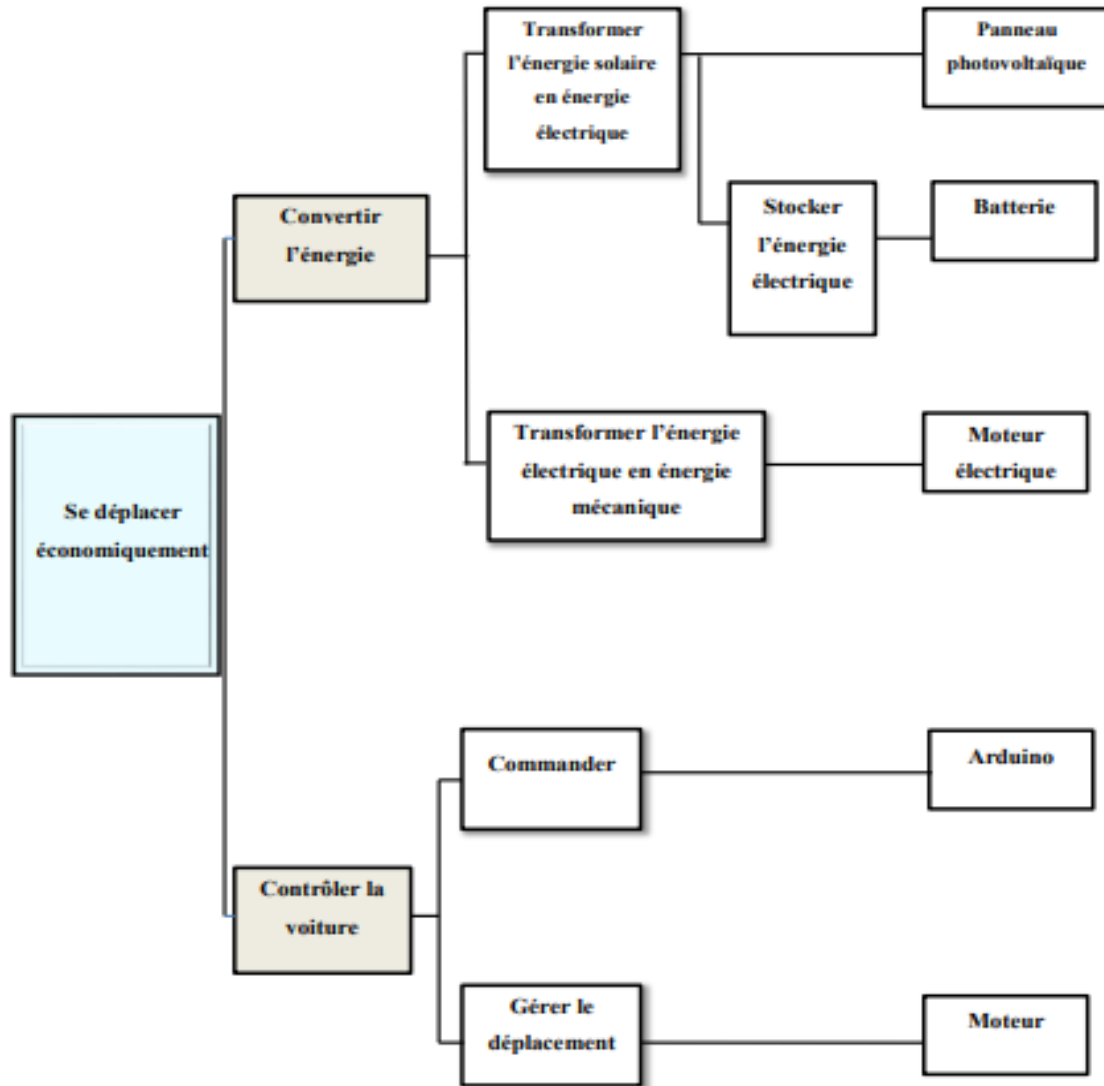


Figure 34: Diagramme FAST de la voiture solaire

II. Structure de la voiture solaire

1. Architecture du corps

Le véhicule sur lequel sera implémentée l'architecture de contrôle est schématisé par une plate-forme rectangulaire montée sur trois roues : deux roues motrices parallèles en avant, et une roue libre en arrière.

Ce véhicule solaire est multi-moteur, qui contient deux chaînes de traction indépendantes, afin de motoriser indépendamment les roues. Donc les deux roues motrices sont entraînées indépendamment l'une de l'autre par un moteur à courant continu, et l'équilibre de la plate-

forme est garanti par une roue libre en arrière. Le changement de direction est obtenu grâce à la commande des moteurs en avant.

On peut désigner le véhicule par :

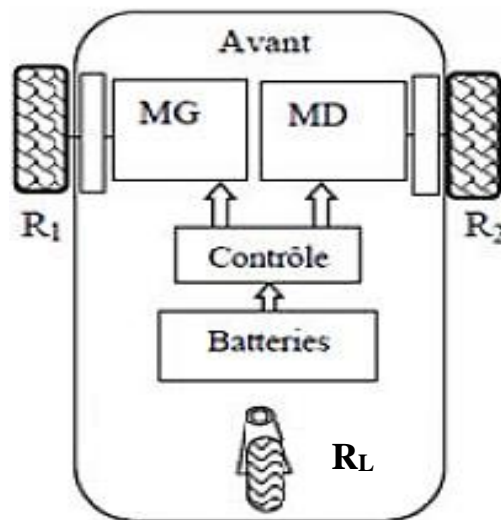


Figure 34: Architecture du corps de la voiture solaire

Ici deux roues R_1 et R_2 indépendantes et rigides au pivotement, réalisent à la fois la propulsion et la direction, l'orientation est obtenue par différence de vitesse des deux roues motrices. La roue libre R_L sera toujours orientée de telle façon à assurer la stabilité du véhicule pour les différents mouvements possibles.

2. Emplacement du panneau solaire

Le panneau solaire c'est la source principale et exclusive d'énergie pour notre véhicule, il faut choisir un emplacement idéal sur la voiture pour le panneau avec l'inclinaison convenable, pour que ce dernier garanti une grande autonomie pour notre véhicule.

Généralement, en ce qui concerne l'orientation du panneau, pour capter le maximum d'énergie, il faut que les rayons solaires rencontrent la surface du panneau à 90° .

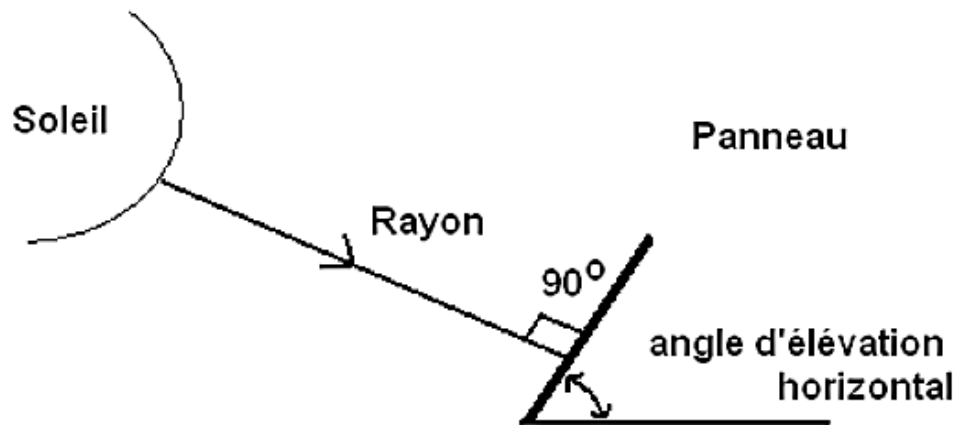


Figure 35: L'orientation idéale du panneau solaire

Mais puisque la voiture change toujours sa direction, il ne faut pas fixer l'orientation du panneau. Après des études, on a conclu qu'on ne peut pas appliquer un suiveur de soleil (Tracker) au-dessus d'une voiture, pour la raison que l'angle d'orientation du suiveur de soleil est limité à 180° , donc ça va risquer de poser le même problème, et le panneau peut être dans des cas opposé au soleil.

Donc l'emplacement pour que le panneau soit orienté vers le soleil dans tous les cas (pas toujours à 90°), c'est sur le toit de la voiture.

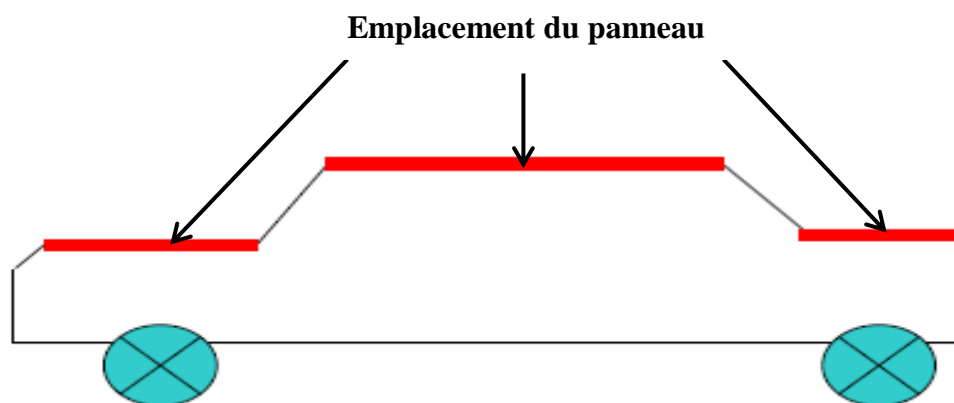


Figure 36: L'emplacement du panneau sur la voiture

3. Structure technique

Après l'installation des moteurs et du corps de la voiture, et le montage du panneau sur le toit, il reste le montage de ce dernier avec le corps de la voiture.

Pour des raisons de bon fonctionnement, on ne peut pas lier le panneau solaire directement avec la carte du contrôle des moteurs, donc le panneau va être principalement destiné à

charger la batterie, et cette dernière va être connectée à la carte du contrôle pour fournir l'énergie électrique nécessaire au fonctionnement des moteurs.

On obtient alors le schéma de montage suivant :

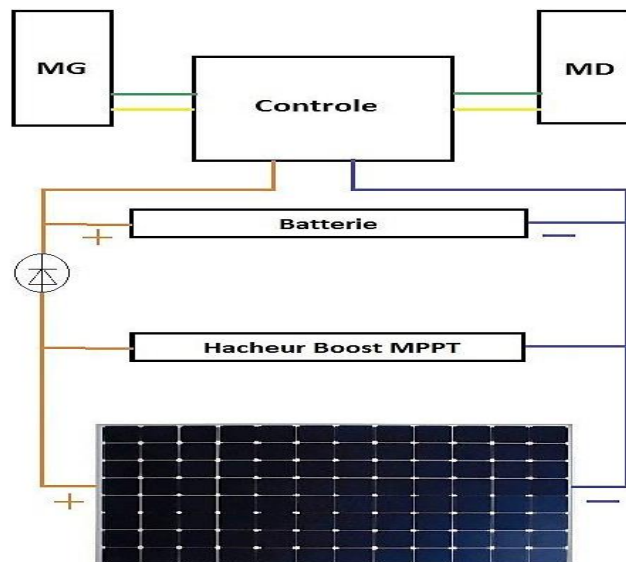


Figure 37: Structure technique de la voiture solaire

Dans le cas où le panneau n'est pas face au rayonnement solaire, la tension entre ses bornes ça va être inférieure à la tension de la batterie, donc le panneau ça va se comporter comme un récepteur et la batterie génératrice, ce qui va détériorer le panneau solaire, c'est pourquoi la nécessité de mettre une diode anti-retour permet de protéger le panneau.

Entre le panneau solaire et la batterie, c'est nécessaire de mettre un hacheur élévateur (boost converter), qui contient un système MPPT pour chercher toujours la puissance optimale du panneau.

III. La commande par Bluetooth

Le Bluetooth est une technologie permettant de faire communiquer des appareils électroniques entre eux via des ondes hertziennes et aucun fil n'est nécessaire.

Il s'agit donc de réaliser une voiture commandée avec une carte Arduino, la télécommande étant un Smartphone Android en communication via Bluetooth avec la carte Arduino.

Pour piloter les deux moteurs de la voiture, c'est nécessaire d'utiliser une carte de puissance (pilote moteur), la voiture se déplaçant à droite ou à gauche en jouant sur la puissance délivrée au moteur droit ou moteur gauche.

Pour commander alors la voiture, nous allons la doter d'un capteur Bluetooth. A partir d'une application, le Smartphone enverra des chaines de caractère (à droite, à gauche, en arrière, en avant) qui seront reçues et traitées par la carte Arduino.

1. Les composants et le schéma de raccordement

Les composants de base pour la commande par Bluetooth sont :

- Une batterie (maximum 12 V)
- Pilote moteur (L298n)
- Deux moteurs à courant continu
- Carte Arduino (UNO R3)
- Module Bluetooth (HC-06)

Les caractéristiques de chaque composant sont détaillées dans la partie (V. Choix des composants de la voiture)

Les connexions sont simples, sont présentées dans le schéma suivant en utilisant l'application Fritzing :

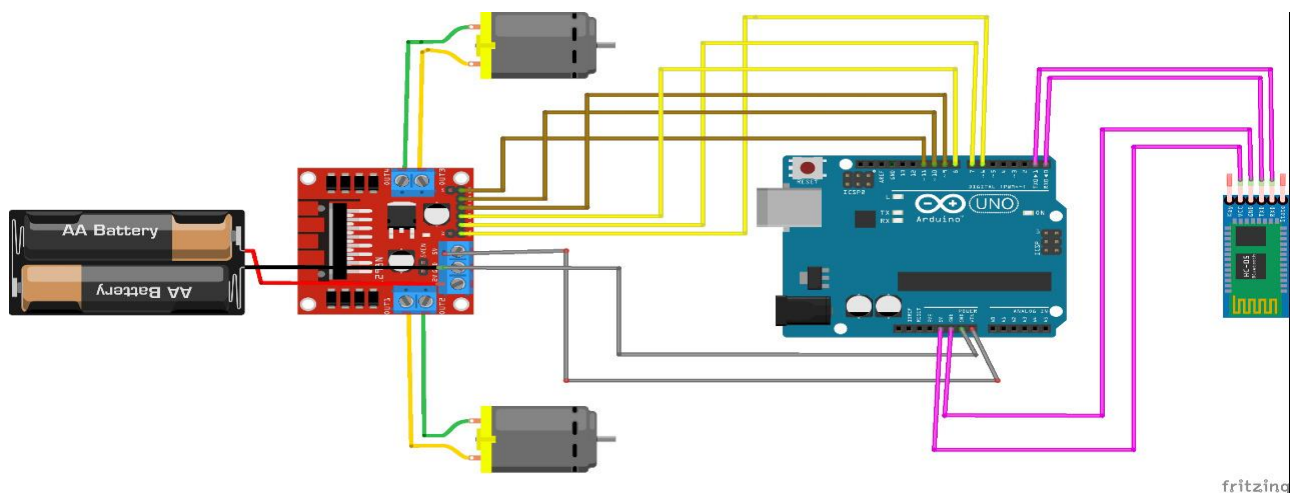


Figure 38: Schéma de la commande par Bluetooth par application Fritzing

❖ Le branchement

- Notre capteur Bluetooth se compose de 4 broches :

Broche power que la carte Arduino alimentera en 5 V

Broche de masse (GND) que l'on reliera à la masse de la carte Arduino

Broche RX : celle-ci reçoit des données que l'on reliera à TX de l'Arduino

Broche TX : celle-ci envoie des données que l'on reliera à RX de l'Arduino

- Broches de l'Arduino 8, 9, 10, 11 sont connectés aux IN1 IN2, IN3, IN4 de L298n.
- Connecter le fil positif de batteries à la broche de (12V) et négatif à la masse (GND) du L298n, puis même GND au GND de l'Arduino.
- Connecter le premier moteur sur les broches OUT1 et OUT2 du L298N, et le deuxième aux broches OUT3 et OUT4.

2. Le programme Arduino

Le programme fait pour commander la voiture avec Bluetooth suivant ce schéma de raccordement c'est le suivant :

```
char var;
int speeden=10;

void setup() {
  Serial.begin(9600)
  pinMode(9,OUTPUT);
  pinMode(7,OUTPUT);
  pinMode(8,OUTPUT);
  pinMode(10,OUTPUT);
}

void loop() {
  var=Serial.read();
  if(var=='F')
  {
    digitalWrite(8,LOW);
    digitalWrite(7,HIGH);
    digitalWrite(9,HIGH);
    digitalWrite(10,LOW);
  }
  if(var=='B')
  {
    digitalWrite(8,HIGH);
    digitalWrite(7,LOW);
    digitalWrite(9,LOW);
    digitalWrite(10,HIGH);
  }
  if(var=='L')
  {
    digitalWrite(8,HIGH);
    digitalWrite(7,LOW);
    digitalWrite(9,LOW);
    digitalWrite(10,LOW);
  }
  if(var=='R')
  {
    digitalWrite(10,LOW);
    digitalWrite(7,LOW);
    digitalWrite(9,LOW);
    digitalWrite(10,HIGH);
  }
}
```



Figure 39: Programme de la commande par Bluetooth

3. Application de commande

Il y'a de méthodes pour avoir une application qui commande les voitures par Bluetooth :

- La première méthode c'est de programmer une application, à l'aide d'une application qui s'appelle Appinventor, c'est une application simple à utiliser, elle donne tous les instructions à suivre pour régler une application, mais une petite formation sur cette application est nécessaire avant de programmer votre application.



Figure 40: Logo d'Appinventor

- La deuxième méthode consiste à télécharger une application Android dans Play store, il y a plusieurs application qui sont destinées principalement a commandé une voiture par Bluetooth, et elles sont adaptées à tous les types de programmes, donc il suffit de choisir et télécharger une.

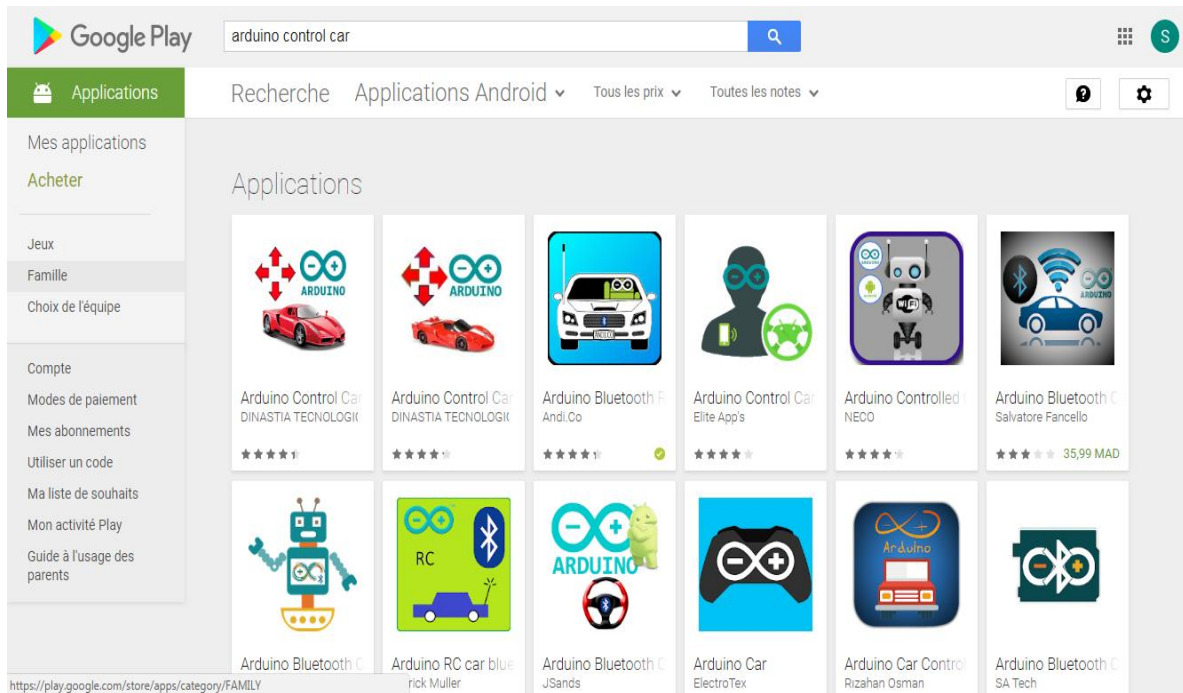


Figure 41: Les applications de la commande Bluetooth

Pour notre cas nous avons choisi la 1ere méthode c'est adire de programmer une application a l'aide de APPinventor

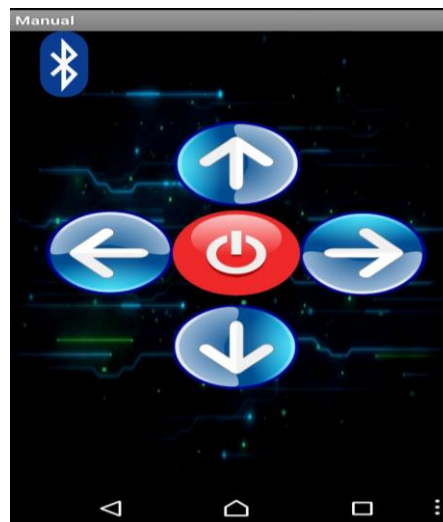


Figure 42 : Application bluetooth

IV. Hacheur

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques continu-continu. Ils permettent, à partir d'une tension continue fixe, d'obtenir une tension continue de valeur différente.

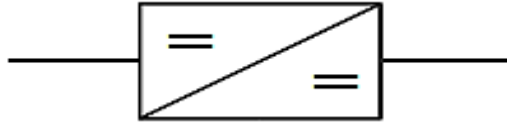


Figure 43: Symbole hacheur

Il existe deux principaux types des hacheurs :

1. Hacheur série (Buck converter)

Le hacheur série ou le convertisseur abaisseur permet d'obtenir à partir d'une tension continue fixe, une tension continue d'une valeur inférieure à la tension d'entrée.

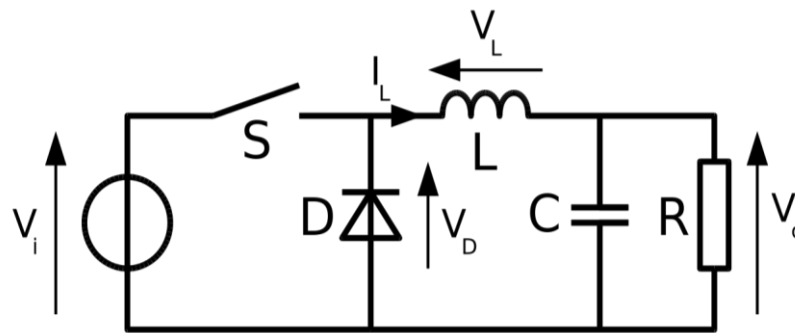


Figure 44: Schéma d'un hacheur série (Buck)

2. Hacheur parallèle (Boost converter)

C'est un convertisseur statique élévateur, qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur.

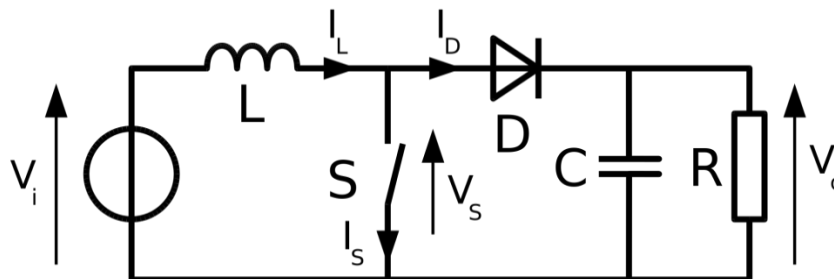


Figure 45: Schéma d'un hacheur parallèle (Boost)

Le hacheur parallèle est composé principalement d'une inductance et un interrupteur S commandé par un signal fréquentiel. Selon l'état de cet interrupteur, on peut distinguer deux phases de fonctionnement :

- La phase active lorsque l'interrupteur S est fermé. Durant cette séquence, le courant traversant l'inductance L va augmenter linéairement et une énergie W_L est stockée dans L. Le condensateur C fournit de l'énergie à la charge R.
- La phase de roue libre lorsque l'interrupteur S est ouvert. Durant cette séquence, l'énergie emmagasinée dans l'inductance L est restituée au condensateur C et à la charge R. Lors de cette phase, le fait que l'inductance L soit en série avec la source de tension d'entrée permet d'obtenir un montage survolteur.

3. Dimensionnement d'un hacheur élévateur

Avant de commencer la réalisation d'un hacheur parallèle, il faut nécessairement faire un dimensionnement pour savoir les types et les valeurs des composants, qui vont être déterminés en fonction des données de la tension d'entrée et la tension de sortie.

On peut donc dimensionner les composants du hacheur à partir des données suivants :

- F = Fréquence de commutation = 50 KHz
- P = Puissance d'entrée = 2 W
- V_{PV} = Tension d'entrée = 6 V
- I_{PV} = Courant d'entrée = 0.33 A
- V_S = Tension de sortie = 8 V

a. Dimensionnement de l'inductance

On peut de terminer la valeur de l'inductance par la relation suivante :

$$L \geq \frac{V_{pv} \times \alpha}{F \times \Delta I_L}$$

- On calcule tout d'abord le rapport cyclique α qui est donné par l'expression :

$$\alpha = 1 - \frac{V_{PV}}{V_S} = 1 - \frac{6}{8}$$

$$\alpha = 0.25$$

- On calcule maintenant le ΔI_L :

On a ($\Delta I_L = 20\% \text{ à } 40\% I_L$), on prend alors $\Delta I_L = 30\% I_L$

Il faut calculer alors le courant I_L qui traverse la bobine

On a lorsque l'interrupteur S est fermé :

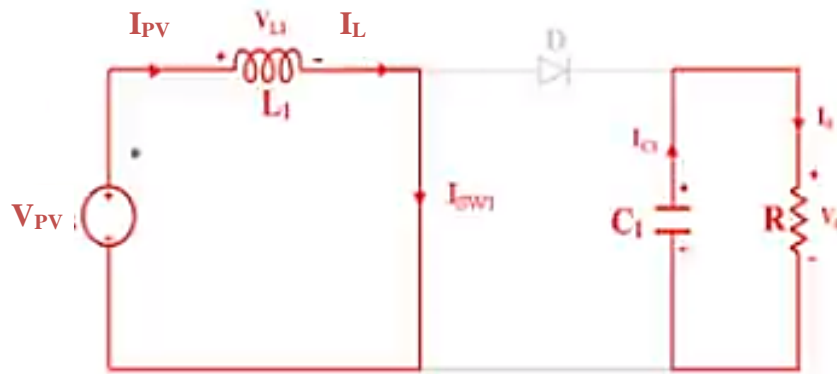


Figure 46: Dimensionnement de l'inductance

$$I_{PV} = I_L \Leftrightarrow I_L = 0.33A$$

Donc

$$\Delta I_L = 30\% \times 0.33$$

$$\Delta I_L = 0.1 A$$

- Donc on a

$$L \geq \frac{V_{pv} \times \alpha}{F \times \Delta I_L}$$

$$L \geq \frac{6 \times 0.25}{50 \times 10^3 \times 0.1}$$

$$\boxed{L \geq 0.3 \text{ mH}}$$

Donc après calcul, il faut choisir une bobine d'une valeur au minimum 0.3 mH.

b. Dimensionnement du condensateur

On peut de terminer la valeur de l'inductance par la relation suivante :

$$C \geq \frac{\alpha \times I_s}{f \Delta V_S}$$

- On a le rapport cyclique α :

$$\alpha = 1 - \frac{V_{PV}}{V_S} = 1 - \frac{6}{8}$$

$$\alpha = 0.25$$

- On calcule maintenant le ΔV_S :

On a ($\Delta V_S = 1\% \text{ à } 5\% V_S$), on prend alors $\Delta V_S = 2\% V_S$

Et on a

$$V_S = 8V$$

Donc

$$\Delta V_S = 2\% V_S = 0.16 V$$

- On calcule le courant de sortie I_S :

On a

$$I_S = \frac{P}{V_S} = \frac{2}{8}$$

$$I_S = 0.25 A$$

- Donc on a

$$C \geq \frac{\alpha \times I_S}{f \Delta V_S}$$

$$C \geq \frac{0.25 \times 0.25}{50 \times 10^3 \times 0.16}$$

$$\boxed{C \geq 7.82 \mu F}$$

Donc un condensateur de valeur 7.82 μF suffit pour obtenir une tension de sortie de valeur désirée.

4. La commande d'un hacheur élévateur

D'après les courbes représentatives courant-tension et puissance-tension de la cellule photovoltaïque (Partie 2 - IV. Caractéristiques de la cellule photovoltaïque), on conclut que la

température et l'éclairement influencent sur la puissance délivrée par le panneau solaire. Pour résister à cette influence, nous insérons dans le montage, entre le panneau et la charge, un hacheur élévateur à rapport cyclique variable α , généré par un système de commande MPPT, afin que la puissance délivrée par le panneau soit optimale quel que soit l'éclairement et la température ambiante. L'objectif alors de la commande MPPT consiste à amener le système à son optimum de puissance et à l'y maintenir en dépit des variations de paramètres.

Le principe de cette commande consiste à générer des perturbations en diminuant ou en augmentant le rapport cyclique α et d'observer l'effet sur la puissance délivrée par le panneau solaire.

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

La méthode de perturbation et observation (P&O) est une approche largement répandue dans la recherche de MPPT, parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque V_{PV} et I_{PV} respectivement, elle peut dépister le point maximum de puissance même lors des variations de l'éclairement et la température.

Comme son nom l'indique, la méthode P&O fonctionne avec la perturbation de la tension V_{PV} et l'observation de l'impact de ce changement sur la puissance de sortie du panneau photovoltaïque.

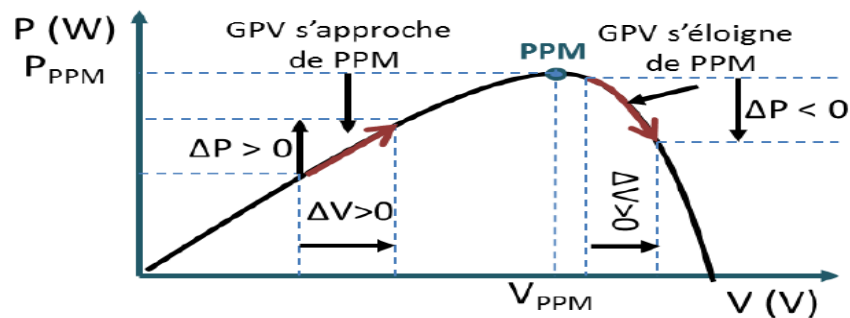


Figure 47: Caractéristique de la puissance d'un module PV

L'algorithme de cette commande est présenté par :

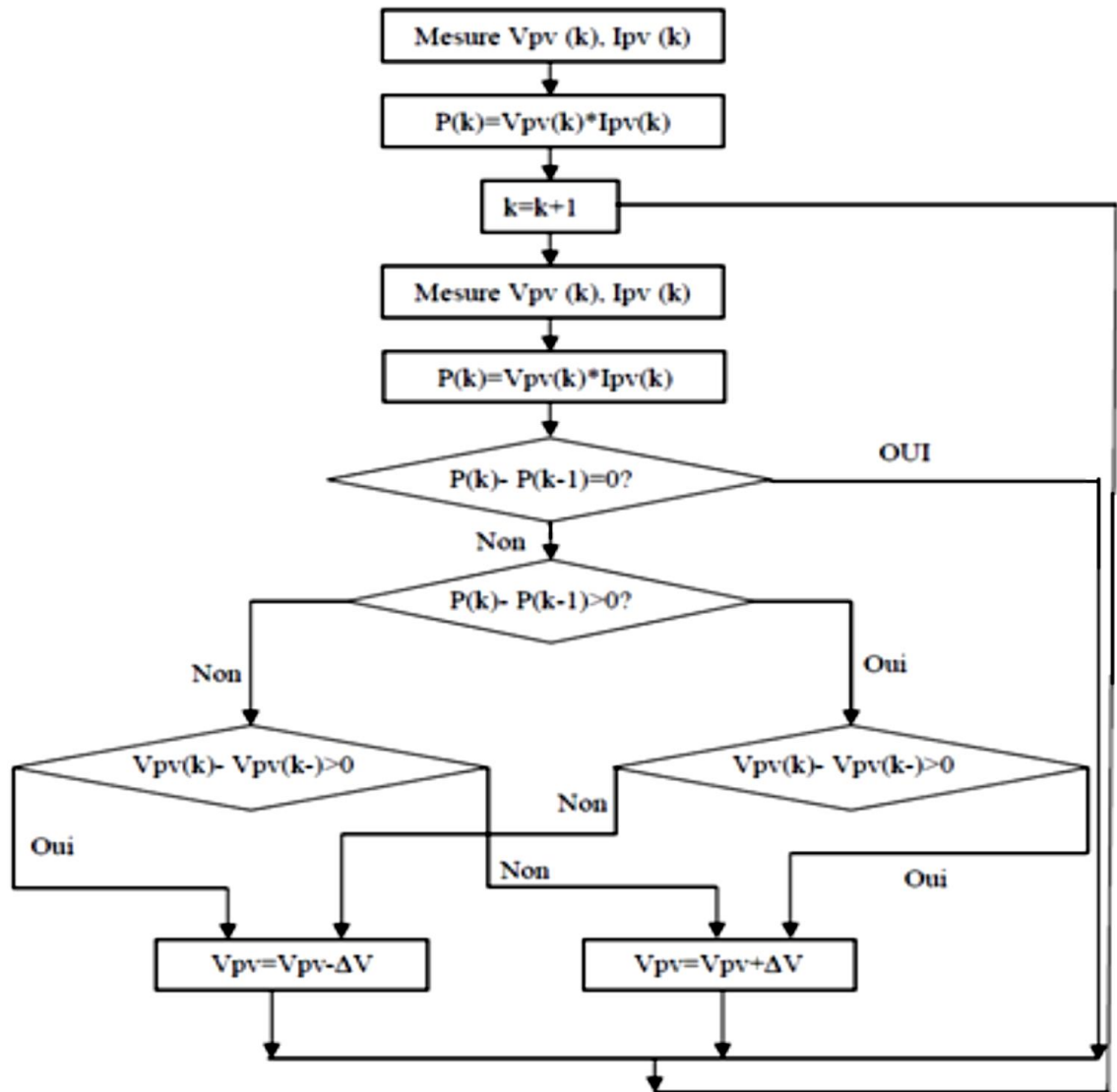


Figure 48: Algorithme P&O de la commande MPPT

À chaque cycle, V_{PV} et I_{PV} sont mesurés pour calculer $P_{PV}(k)$. Cette valeur de $P_{PV}(k)$ est comparée à la valeur $P_{PV}(k-1)$ calculée au cycle précédent. Si la puissance de sortie a augmenté, V_{PV} est ajustée dans la même direction que dans le cycle précédent. Si la puissance de sortie a diminué, V_{PV} est ajustée dans la direction opposée que dans le cycle précédent. V_{PV} est ainsi perturbée à chaque cycle de MPPT.

b. Simulation d'un hacheur élévateur commandé par MPPT

On peut simuler le hacheur élévateur commandé par MPPT dans Proteus par le schéma suivant :

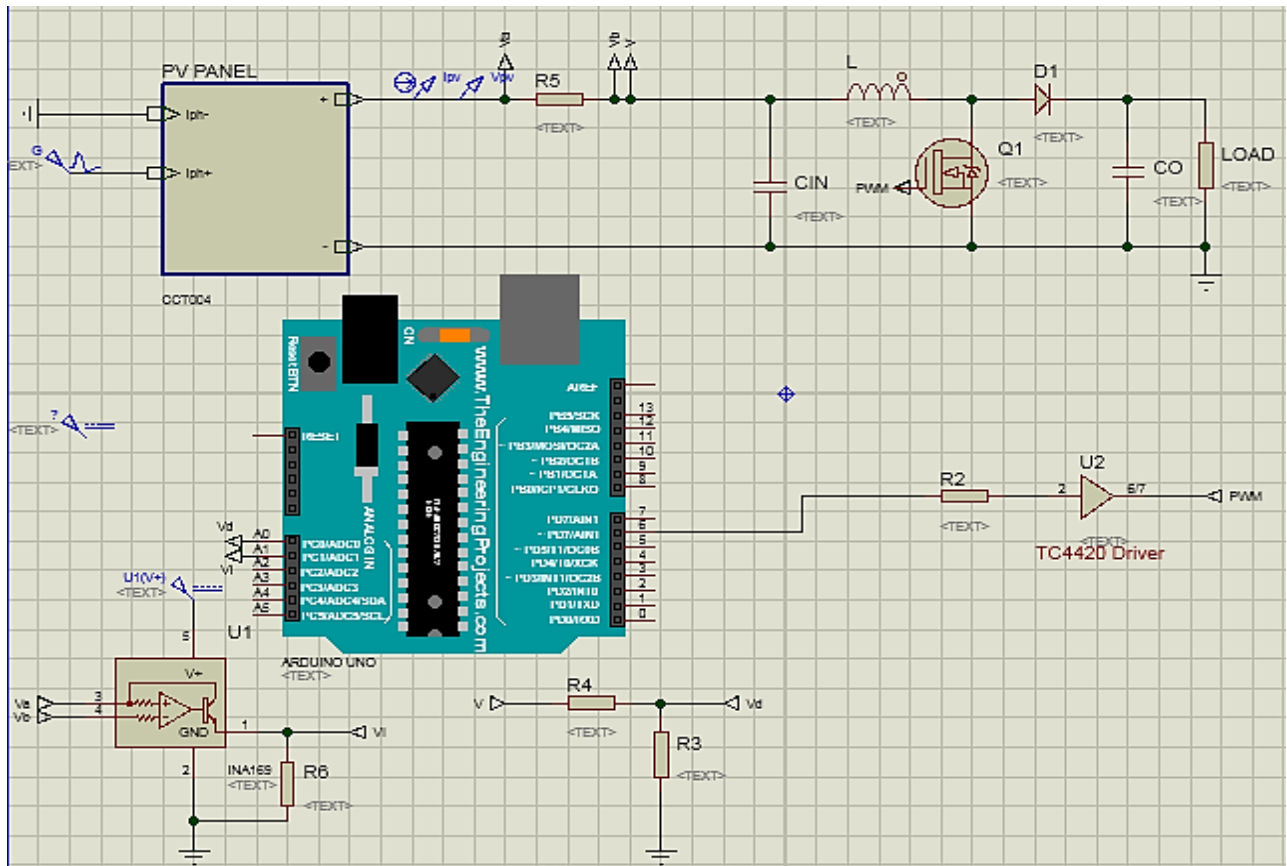


Figure 49: Simulation d'un hacheur élévateur commandé par MPPT dans Proteus

La commande d'un hacheur élévateur par MPPT, nécessite d'autres composants que celle du hacheur :

- Le capteur de tension : c'est un diviseur de tension qui permet de diminuer la tension du panneau à une tension inférieure à 5V, car c'est la tension maximale que l'Arduino peut supporter. On représente le diviseur de tension par le schéma suivant :

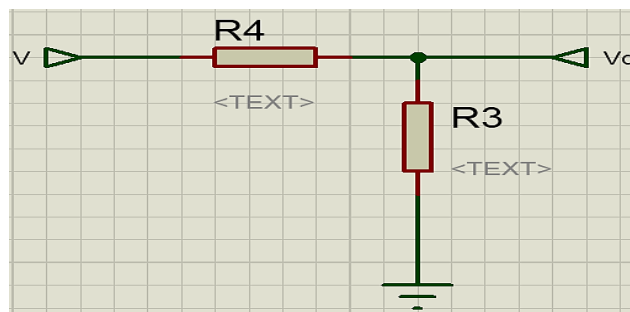


Figure 50: Diviseur de tension

On calcule la valeur des résistances R3 et R4 par la relation suivante :

$$V_d = V \times \frac{R_3}{R_3 + R_4}$$

Et pour notre cas, on a :

$$V = 6V \text{ et } V_d = 4V$$

On fixe une valeur à la résistance R3, et on cherche la résistance R4 équivalente par la relation suivante :

$$R4 = \frac{R3(V - V_d)}{V_d}$$

On pose $R3 = 10.11 \text{ k}\Omega$

Et on trouve $R4 = 5 \text{ k}\Omega$

- Le capteur de courant : il est utilisé pour donner à l'Arduino la valeur du courant du panneau solaire.

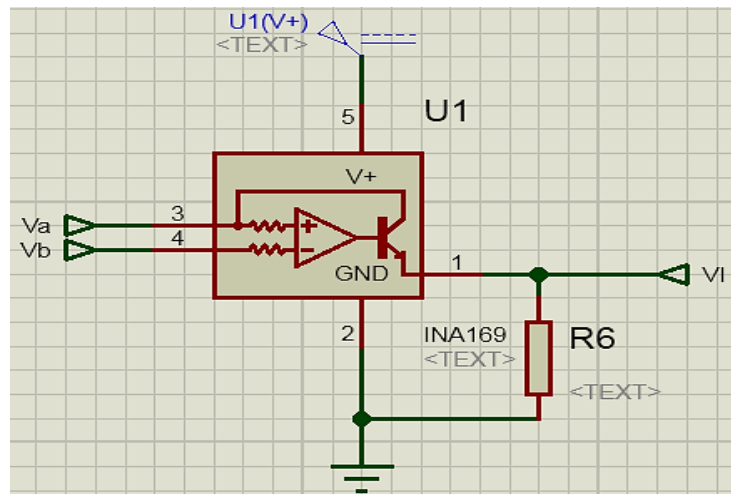


Figure 51: Capteur de courant

Il existe plusieurs types des capteurs de courants, et il faut choisir le plus convenable selon le courant maximal du panneau.

Pour notre cas, on peut choisir un parmi les capteurs suivants :

- ♦ ACS 712
- ♦ ACS 712 5A
- ♦ INA 219B

V. Choix des composants de la voiture

Pour faire un bon choix de composants, il faut avoir pris connaissance de l'analyse fonctionnelle, et choisir le composant répondant le mieux à leur cahier des charges.

Durant notre recherche et notre choix, on pose toujours des questions concernant le poids, le coût et les dimensions du composant, pour s'assurer que ce composant répond correctement aux règles du cahier des charges.

1. Le Panneau photovoltaïque

C'est le capteur solaire qui est destiné à récupérer une partie du rayonnement solaire pour le convertir en énergie électrique, afin de charger la batterie et alimenter la voiture.



Figure 52: Panneau photovoltaïque utilisé

❖ Specifications:

- Type : Silicium polycristallin
- les cellules solaires sont enfermées et protégées par un cadre extérieur durable de poly
- Dimensions : 136 x 110 x 3mm
- Courant de court-circuit (maximum) : $I_{sc} = 0,43 \text{ A}$
- Tension de circuit ouvert (maximal) : $V_{oc} = 7 \text{ V}$
- Courant de fonctionnement (en charge) : $I_{op} = 0,33 \text{ A}$
- Tension de fonctionnement (en charge) : $V_{op} = 6 \text{ V}$

- Puissance : 2 W

Les dimensions du panneau et son poids sont convenables avec les dimensions de la voiture, de plus, la puissance délivrée par le panneau permet de charger la batterie dans une durée optimale, donc on peut affirmer que c'est un bon choix pour la voiture.

2. Le Moteur

Ce motoréducteur (moteur + engrenages), possède une tension de commande de 6V et une vitesse de rotation de 220 tours/min.



Figure 53: Motoréducteur

❖ Specifications:

- Rapport de réduction: 48 :1 (1 tour de roue pour 48 tours moteur)
- Vitesse hors-charge (3V) : 100 tours/min
- Vitesse hors-charge (6V) : 220 tours/min
- Courant hors-charge (3V) : 60mA
- Courant hors-charge (6V) : 71mA
- Poids du moteur : 50 g
- Dimensions du moteur : 70 x 22 x 18mm

Pour les exigences du cahier des charges, ce moteur est parfaitement adapté et prend place correctement sur la plateforme.

3. Le Pilote moteur L298N

L298N puce double pilote H-pont, C'est un module extrêmement utile pour le contrôler de robots et ensembles mécanisés, et aussi les moteurs à courant continu.

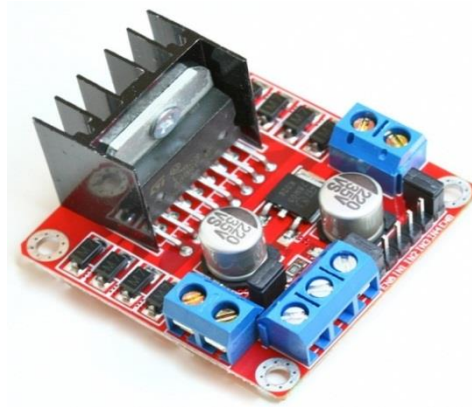


Figure 54: Pilote moteur L298N

❖ **Specifications:**

- Tension de fonctionnement interne: 5V
- Tension d'alimentation : 5V-35V
- Courant logique : 0 mA-36mA
- Courant : 2A max
- Puissance maximale : 25W

Cette carte répond largement aux demandes du cahier des charges. Les entrées et sorties sont en nombre suffisant et l'alimentation suffisamment puissante. Par ailleurs, cette carte est conseillée par le constructeur du module robot pour le développement et le pilotage.

4. La Batterie

Une batterie Li-Ion (Lithium) délivre 3,7 V. Ce type d'accumulateur est très pratique par rapport aux autres accumulateurs existants, puisqu'il n'est pas sensible à l'effet mémoire (attendre la fin de la batterie pour la recharger).



Figure 55: Batterie Li-Ion

❖ **Specifications:**

- Marque : Samsung
- Model : ICR18650-22E
- Tension nominale: 3.7V

- Capacité: 2200 mAh
- Chimie: Lithium Ion (Li-Ion)
- Dimensions: 65x18 mm
- Poids: 50 g

Concernant les exigences du projet, elle peut être rechargée par le panneau solaire, et ses dimensions rentrent complètement dans la recherche d'optimisation de place dans le châssis ainsi que son poids. Nous pouvons donc affirmer que ce choix est judicieux puisqu'on va utiliser deux batteries.

5. La carte Arduino UNO R3

Arduino UNO R3 est la plus récente de la famille Arduino, elle est livrée équipée du microcontrôleur ATmega328 préprogrammé avec le bootloader, et ça représente le cerveau de la voiture solaire.

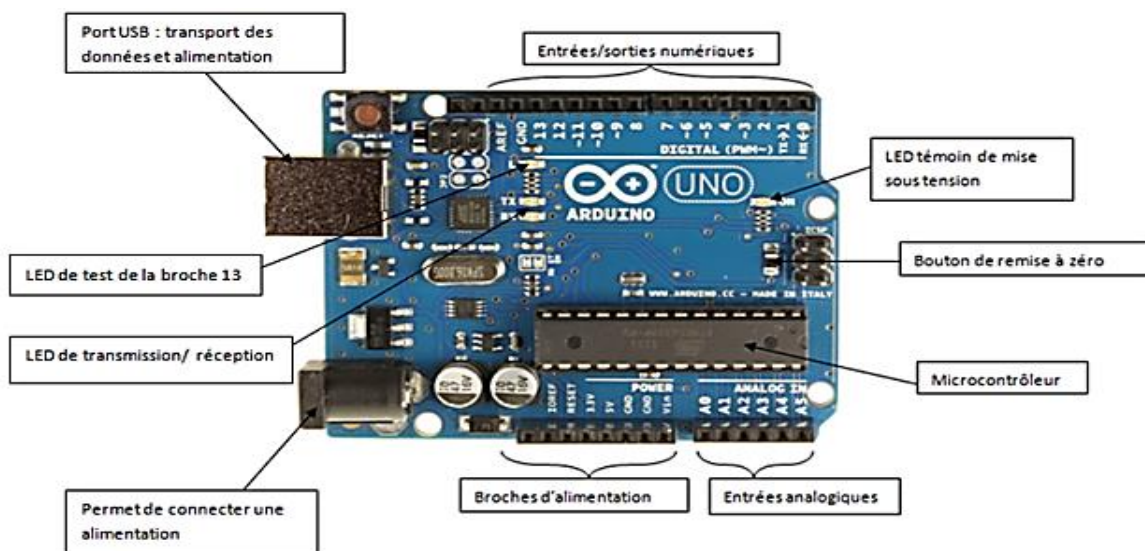


Figure 56: Carte Arduino UNO R3

❖ Specifications:

- Microcontrôleur : Atmel ATmega328 à 16 Mhz, 2K Ram.
- 14 Entrées/Sorties numériques dont 6 Sorties MLI (PWM).
- 6 Entrées Analogiques utilisables en Entrées/Sorties numériques.
- Alimentation par port USB ou externe de 7V à 12V CC.
- Sorties d'alimentation 5V / 3.3V et externe.
- Dimensions: 90x80 mm
- Poids: 40 grammes



6. Le module Bluetooth

Le module Bluetooth HC-06 permet d'établir une liaison Bluetooth entre une carte Arduino et un autre équipement possédant une connexion Bluetooth (Smartphone).



Figure 57: Module Bluetooth HC-06

❖ Specifications:

- Tension d'alimentation: +3,3V à 5V
- Température de fonctionnement: - 20 à 55 °C
- Dimensions: 36.5x16mm
- Poids: 4g

Conclusion

Pour une réalisation parfaite une étude et une conception est nécessaire. Et après une conception globale de la voiture solaire, il nous manque que la réalisation de la voiture solaire en appliquant les études présentées dans ce chapitre , chose qu'on a pas pu la faire vue la pandémie dont notre pays souffre en ce moment .

Conclusion Générale

C'est avec le plus grand honneur que nous avons travaillé avec un meilleur encadrant, et un meilleur groupe, c'est la vraie raison pour laquelle on a pu compléter et présenter ce travail.

Nous avons mobilisé tout notre savoir et nos compétences pour relever le défi de la conception d'une voiture solaire, et les différentes étapes de réalisation de notre projet nous ont permis l'acquisition de plusieurs points bénéfiques, pouvant être essentielles et importantes dans notre vie professionnelle, tel que le baguage technique d'énergie solaire.

Le travail présenté dans ce rapport de projet de fin d'année porte sur la conception et la réalisation de la voiture solaire. Nous avons donné un aperçu général sur l'énergie solaire et les voitures solaires. Ensuite nous avons présenté une description des systèmes photovoltaïques et des études sur le fonctionnement des cellules photovoltaïques. Ainsi que nous avons fait une conception de la voiture solaire, contenant l'étude et le dimensionnement d'un hacheur commandé par MPPT, et l'architecture globale de notre prototype.

La voiture solaire reste un prototype en développement, car elle possède encore beaucoup de problèmes qui les rendent seulement des voitures de course, et non pour la vie quotidienne. Le problème majeur de ces voitures sont les panneaux photovoltaïques, leurs poids et leurs formes ne conviennent pas à une voiture sophistiquée. Alors pour faire face à ce problème, nous envisageons d'introduire la peinture solaire dans le domaine d'automobile, cette peinture solaire est un capteur d'énergie solaire et d'humidité, et elle peut remplacer les panneaux photovoltaïques ; la peinture solaire a beaucoup d'avantages, tel qu'elle peut avoir toutes les couleurs, plus qu'elle peut produire l'énergie avec une très grande efficacité. Donc l'intégration de cette technologie dans le domaine automobile résoudra les problèmes des voitures solaires, car cette peinture va garder la forme sophistiquée des voitures tout en produisant l'énergie nécessaire pour le déplacement, ce qui va créer une grande évolution dans ce domaine.

Bibliographie

- [1]. http://ww2.ac-poitiers.fr/electrotechnique/energie_solaire_photovoltaique.pdf
- [2]. https://fr.wikipedia.org/wiki/Panneau_solaire
- [3]. <https://www.planetsolar.swiss/wp-content>
- [4]. <https://docplayer.fr/4732293-Le-defi-solaire-vehicule-solaire.html>
- [5]. <http://www.memoirepfe.fst-usmba.ac.ma>
- [6]. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01351493/document>
- [7]. <https://www.mathworks.com/61480-matlab-simulink-model-of-photovoltaic-cell-panel-and-array>
- [8]. <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16696>
- [9]. https://www.academia.edu/14683648/Voiture_Solaire
- [10]. <https://studylibfr.com/doc/4020520/dossier-4---vehicule-solaire>
- [11]. https://www.academia.edu/MPPT_implementation_in_Proteus_The_optimization_of_the_PV_energy_using_an_Embedded_System
- [12]. <https://www.hackster.io/GeekRex/turn-your-rc-car-to-bluetooth-rc-car-1b0689>
- [13]. <https://www.electronique-mixte.fr/wp-content>
- [14]. <https://www.edfenr.com/actualites/peinture-solaire>
- [15]. <http://colbertserv.lyceecolbert-tg.org>