



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière d'Electrotechnique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Filière : Electrotechnique
Spécialité : système solaire photovoltaïque

Présenté et soutenu par :

RAID AHMED

Le :

D'étude d'un Fauteuil Roulant Electrique Adapté par Panneau Solaire

Jury :

Mr	HAMOUDI .M .YACINE	MCA	Président
Mr	REZIG MOHAMED	MCB	Rapporteur
Md	GUERGAZI. AICHA	MCA	Examineur

Cachet et signature

Année universitaire : **2019/2020**

RESUME

Les travaux présentés dans cette mémoire ont tous pour objectifs d'étude d'un fauteuil roulant électrique adapter par panneau solaire Et pour ce vison nous avons pensé installer des panneaux solaires à l'arrière et en haut du fauteuil afin de rallonger l'autonomie des fauteuils, mais aussi les rendre autonomes. Donc nous d'étude à une meilleure compréhension des performances de convertisseur DC-DC adapté par la commande MPPT lorsqu'il est couplé à un générateur photovoltaïque afin d'obtenir une bonne source qu'on peut utiliser comme un générateur d'électricité.

De toutes ces énergies, le principe de la conversion photovoltaïque, la cellule PV et ses paramètres. En suite étudie les effets de variations des paramètres : éclairément et température, sur la courbe I-V et sur la puissance extraite du GPV. C'est l'énergie solaire qui offre le potentiel le plus important. De plus, elle connaît actuellement un fort développement dans le monde. Ce développement est dopé par les politiques internationales et nationales. Un Modèle de commande optimale. un dimensionnement du système étudier

Dédi cace

A MES TRES CHERS PARENTS, SOURCE DE VIE D'AMOUR ET D'AFFECTION.

A MES CHERS FRERES ET CHERS SŒURS, SOURCE DE JOIE ET DE BONHEUR.

A TOUTE MA FAMILLE, SOURCE D'ESPOIR ET DE MOTIVATION.

A TOUS MES AMIS, TOUS PARTICULIEREMENT AMIN ET AKRAM ET ISLEM ZAZA ET

BALI

*SELMAN ET OUSAMA ET NASRO ET TALYANI ET DUODI EI JIMI ET SIMCA ET
AAZDINE ET KADER ET BILAL ET HOUDA ET RITAGE ET MERY AME ET ZOLA ET*

ASMA

ATOUS MES COLLEGUES ET AMIS POUR LES MOMENTS AGREABLES ET

INOUBLIABLES

QUE NOUS AVONS PASSES ENSEMBLE. SUR TOUS MAIS AMIS DE PROMOTIONS DE

2^{EME} ANNEE MASTER

AEUX TOUS, JE SOUHAITE UN AVENIR PLEIN DE JOIE, DE BONHEUR ET DE

SUCCES.

A TOUS MES ENSEIGNANTS SUR TOUT MON ENCADREUR MOHAMED REZIG.

Remerciement

AVANT TOUT NOUS TENONS NOS REMERCIEMENTS A NOTRE DIEU DE NOS AVOIR
DONNE LA FORCE ET LE COURAGE, JE NE SAURAI REMERCIER SUFFISAMMENT MA
MERE, MES FRERES ET SŒURS POUR LEUR SOUTIEN INESTIMABLE. QUE TOUS
SOIENT ASSURES DE MA PROFONDE GRATITUDE.

J'EXPRIME TOUTE MA GRATITUDE ET RECONNAISSANCE A MON DIRECTEUR DE
THESE MONSIEUR *MOHAMMED REZIG*, PROFESSEUR A L'UNIVERSITE DE BESKRA,
POUR LES PRECIEUX CONSEILS QU'IL M'A SU DONNES ET L'ATTENTION ET LE
SERIEUX AVEC LESQUELS IL A SUIVI DE PRES MES TRAVAUX DE RECHERCHE.
JE N'OUBLIE PAS TOUS MES AMIS POUR LEUR DISPONIBILITE ET LEUR SOUTIEN QUI
M'ONT SUIVIE ET AIDEE DANS MON TRAVAIL POUR M'AVOIR DONNE LE POINT DE
VUE ET TOUT EN CHERCHANT A CADRER MON TRAVAIL.

ENFIN, ET EN PARTICULIER MERCI AUX CHERCHEURS DE L'UNIVERSITE DE
KHMIS MILIANA QUI ONT SU M'AMENER UN QUOTIDIEN AGREABLE.

SOMMAIRE

Résumé.....	01
Introduction générale	01

CHAPITRE 1: généralité sur le système photovoltaïque

1.1 Introduction.....	03
1.2 Ressource solaire	03
1.2.1 Normalisation	04
1.3 Cellules photovoltaïques	04
1.3.1 L'effet photovoltaïque	04
1.3.2 Historique	05
1.3.3 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	06
1.3.4 Technologie d'une cellule photovoltaïque	07
1.3.5 Fabrication des panneaux photovoltaïques à cellules cristallines.....	08
1.4 Caractéristiques de la cellule photovoltaïque	09
1.5 Différents types de défauts	10
1.51 Les défauts actionneurs.....	10
1.52 Les défauts capteurs.....	10
1.53 Les défauts composants ou systèmes	10
1.54 Défaut abrupt.....	10
1.55 Défaut graduel.....	10
10	
1.56 Défaut intermittent.....	10
1.6 Le système photovoltaïque	09
1.6.1 Systèmes photovoltaïques avec stockage électrochimique	10
1.6.2 Les panneaux photovoltaïques	11
1.6.3 Les accumulateurs électrochimiques	13
1.6.4 Régulation électronique de la charge	14
1.6.5 Onduleur	
1.7 Caractéristiques propres à un onduleur pour systèmes photovoltaïques (PV).....	15
1.8 Différents types de système photovoltaïques.....	16
1.8.1 Les systèmes autonomes	16
1.8.2 Les systèmes hybrides	17
1.8.3 Système connecté au réseau	17
1.9 Les étapes de dimensionnements d'un système photovoltaïque.....	18
1.10 Les besoins en énergie électrique	19
1.10.1 L'énergie à fournir à l'onduleur et son utilisation	20
1.10.2 L'énergie à fournir à la batterie et son utilisation	21

1.11 L'énergie électrique fournie par le générateur photovoltaïque.....	22
1.11.1 Estimation de l'énergie solaire reçue sur un site donné	23
1.11.2 Les valeurs statistiques de l'énergie solaire	24
1.11.3 Estimation de l'énergie fournie par un panneau photovoltaïque	25
1.12 Dimensionnement du panneau photovoltaïque	26
1.12.1. Choix de la tension du fonctionnement	27
1.13 Dimensionnement de la batterie	28
1.13.1. Rôle du stock d'énergie	28
1.14 Capacité de la batterie	29
1.15 Dimensionnement de l'onduleur.....	30
1.16 Dimensionnement des câbles de raccordement	31
1.17 Conclusion	32

CHAPITRE 2: Fauteuils roulants électriques

2.1Introduction.....	33
2.2Histoire du fauteuil roulant électrique.....	33
2.3Les origines du fauteuil roulant électrique.....	34
2.4Descriptif du fauteuil roulant électrique.....	35
2.5Les différents FRE.....	36
2.5.1Fauteuil d'intérieur.....	36
2.5.2Fauteuil d'extérieur.....	36
2.5.3Fauteuil verticalisateur	37
2.5.6Fauteuil à hauteur variable.....	37
2.6 Les avantages d'un fauteuils roulants électriques.....	38
2.7Les inconvénients d'un fauteuil roulant électrique.....	39
2.8 Batterie lithium pour les fauteuils roulant électriques	40
2.9L'autonomie d'un fauteuil roulant électrique	41
2.11Conclusion.....	44

CHAPITRE 3: Modélisation et Simulation du fauteuil roulant électriques

3.1Introduction.....	45
3.2Qu'est-ce que Simulink?	46
3.3Caractéristiques de régulateur.....	48
3.4Choix d'une batterie pour votre FRE	49
3.5Dimensionnements du système	47

CHAPITRE 4:

Conclusion générale	54
----------------------------------	-----------

Liste des figures :

CHAPITRE 1:

Figure 1.1. : Analyse spectrale du rayonnement global solaire.

Figure 1.2.: Schéma d'une jonction PN.

Figure 1.3.: une cellule photovoltaïque est de convertir de l'énergie lumineuse en énergie électrique.

Figure 1.4. : Etape de fabrication des cellules.

Figure 1.5.: cellule mono cristalline et poly cristalline.

Figure 1.6.: modules verre-verre au Telluride de Cadmium.

Figure 1.7.: module photovoltaïque souple au silicium amorphe α Si triple jonction.

Figure 1.8. : façade en CIGS au Pays de Galles.

Figure 1.9. : module combinant technologie microcristalline et amorphe.

Figure 1.10. : sac à dos incorporant un module de technologie organique DSC.

Figure 1.11.: Cellule Dye Sensitized Cell - coupe explicative.

Figure 1.12. : Efficacités typiques des différentes technologies PV utilisées commercialement (source Photon International Modules Survey 2009).

Figure 1.13. : Fabrication des panneaux photovoltaïques à cellules cristallines.

Figure 1.14. : Caractéristique I(V) d'une cellule solaire, T=25°C.

Figure 1.15. : Les différentes zones de la caractéristique I(V), T=25°C.

Figure 1.16. : Caractéristiques P (V) d'un panneau solaire, T=25°C.

Figure 1.17.: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Figure 1.18.: Schéma synoptique décrivant le système photovoltaïque le plus général.

Figure 1.19.: Schéma synoptique d'Onduleur.

Figure 1.20. : Exemple de la structure d'un système PV isolé et autonome.

Figure 1.21. : L'énergie électrique fournie par un panneau en tenant compte des pertes et les désadaptations.

Figure 1.22. : Choix de la tension de système.

Figure 1.23. : caractéristiques des câbles DC.

CHAPITRE 02:

Figure 2.1. : Les différents types de fauteuils.

CHAPITRE 03:

Figure 3.1 : schéma bloc général de système

C_u = la capacité utile.

C_1 = la capacité nécessaire pour faire face au soleil.

C_2 = la capacité nécessaire pour utiliser au mieux le dimensionnement du panneau.

C_r = la capacité résiduelle

C = la capacité de la batterie

I_{out} : Courant fourni par la cellule.

V_{out} : Tension aux bornes de la jonction.

$I_{ph}(\varphi)$: Courant produit par la photopile, ce courant est proportionnel au flux lumineux.

FF = facteur de forme.

P_{max} = la puissance maximale fournie à l'onduleur

ρ = le rendement

Ei_b = L'énergie fournie par la batterie.

Ei = L'énergie totale moyenne nécessaire chaque jour

Ei_p = L'énergie fournie par le panneau.

V_{co} = la tension de circuit ouvert.

V_{cc} = la tension de court-circuit.

Introduction générale :

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain. Elles proviennent de phénomènes naturels cycliques ou constants induits par les astres : le Soleil essentiellement pour la chaleur et la lumière qu'il génère, mais aussi l'attraction de la Lune (marées) et la chaleur générée par la Terre (géothermie).

Leur caractère renouvelable dépend d'une part de la vitesse à laquelle la source est consommée, et d'autre part de la vitesse à laquelle elle se renouvelle.

De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir des énergies fossiles, la consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution.

Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures, et aussi face aux multiples crises économiques et pétrolières la science s'est intéressée aux ressources dites renouvelables qui constituent un secteur stratégique et occupent une place privilégiée dans les domaines de recherche et développement.

L'expression « énergie renouvelable » est la forme courte et usuelle des expressions « sources d'énergie renouvelables » ou « énergies d'origine renouvelable » qui sont plus correctes d'un point de vue de la physique.

Durant les dernières années, les fauteuils roulants ont connu une grande importance d'utilisation par les gens handicapés, ceci a mené les chercheurs dans le domaine de la robotique à effectuer plusieurs recherches pour assurer le soulagement de ces gens.

Dans ce mémoire nous avons présenté une méthode pour but de développer un fauteuil roulant électrique alimenté par panneau solaire, permettant de trouver une solution de stockage pour plus long temps, Cette méthode appelée LPSP (Loss of Power Supply probability) permet de calculer le nombre optimal de batteries et modules photovoltaïques.

Chapitre 1 :

Généralité sur Le Système Photovoltaïque

1. Introduction.

A la différence des autres énergies renouvelables, l'énergie solaire est disponible partout sur la terre. Les centrales solaire PV Produisent 3200 MW au niveau mondial, mais le coût du KWh est environ le double de celui d'un central nucléaire.

Il y a également différents problèmes dû à la limitation des installations, ce qui explique le peu de fabrication d'électricité. Pourtant deux éléments pourraient rendre ce procédé complémentaire à défaut d'être concurrent.

Les usines n'auraient pas besoins d'être énorme et bénéficieraient des progrès technologiques, elles pourront s'installer sur les hauts plateaux d'Allemagne. A nos jours les meilleurs capteurs photovoltaïques ne convertissent que 20 % des rayons du soleil en électricité.

Les cellules à haut rendement serviraient à convertir plus de 30 % des rayons solaires au coût de 1 \$/W. Pour pouvoir dépasser les 30 %, des chercheurs ont eu l'idée, au début des années 1980, de superposer plusieurs semi-conducteurs qui réagissent avec énormément plus de photons.

Les premiers capteurs combinaient 2 jonctions est rendaient 16 % d'électricité.

En 1990 deux agences rivales ont commercialisé du capteur bi jonctions, mais à cause des coûts très élevés, ses capteurs n'étaient destinés qu'aux satellites et autres appareils spatiaux.

Les cellules dépassent aujourd'hui les 30 %, mais les avancées technologiques sont déjà allées bien au-delà (à 41,1 %) grâce aux capteurs tri jonctions. Entre l'industrie et la recherche le traitement des jonctions est différent, chaque jonction fait appelle à un semi-conducteur [1].

différent, la première approche était de faire adopter aux trois couches la même organisation cristalline, mais si ont fait ainsi, le résultat est le moins intense des trois. La solution est d'accepter les différences de structure des trois couches, ce qui permet de tirer le même courant des trois jonctions mais les couches s'assemblent mal et tuent les photons, donc il a fallu mettre une zone non active entre chaque jonction. Depuis une usine a mis au point une quadri jonction et elle pourrait avoir un rendement de 43 % d'ici 2015 et pourquoi pas 50 % une fois le projet finit. Malheureusement le coût reste le problème. Mais pour y remédier les scientifiques concentrent

jusqu'à 500 fois la lumière solaire à l'aide de loupes sur des minuscules capteurs, ce qui fait descendre le prix à 5\$/W. En raison du coût du watt (entre 3 à 7 fois plus cher que le watt nucléaire ou fossile) Cela empêche le décollage du marché. Mais bientôt le watt solaire coûtera 1\$ grâce à de nouvelles cellules photovoltaïques, en plastique baptisée « Power Plastics » en 2000. Ce plastique est semi-conducteur, isolant ou conducteur selon la tension appliquée.

C'est en 1990 que des chercheurs se rendirent compte que certains polymères pouvaient émettre de la lumière, lorsqu'on leur applique un courant ce qui leur permit de prouver que le polymère émettait un courant lorsqu'il était exposé à la lumière. Les cellules du « Power Plastics » peuvent s'adapter à toutes les surfaces aussi bien courbes que planes. Le principe est simple, une électrode transparente laisse passer la lumière jusqu'à une double couche en polymère semi-conducteur puis dans une seconde électrode. C'est dans la seconde couche de polymère que tout ça passe. Dans la première couche les photons sont bombardés de lumière, ce qui déloge les électrons dans les atomes constituant le semi-conducteur.

1.2 Ressource solaire

La source principale de lumière utilisée pour la conversion photovoltaïque (PV) est la lumière dite naturelle du soleil. Il nous faut donc connaître et comprendre le rayonnement solaire terrestre (ayant traversé l'atmosphère) pour étudier les dispositifs photovoltaïques développés pour convertir cette énergie en électricité.

La Terre est située à 150 millions de km du Soleil. Celui-ci émet en permanence 1026 Watt sous forme de rayonnement et la Terre reçoit 178 millions de milliard de Watt sur sa face éclairée soit 350 Watt par m² à l'équateur.

Le rayonnement solaire qui arrive au sol se décomposer en deux parties :

L'une provient directement du soleil (direct), l'autre a été diffusée par l'atmosphère (diffus).

L'atmosphère et la terre possèdent également un rayonnement propre. La connaissance de ces divers rayonnements permet d'établir un bilan radiatif du système terre- atmosphère [2].

Composé essentiellement:

- De lumière visible de longueur d'onde comprise entre 400nm et 800 nm
- De rayonnement infrarouge (IR) de longueur d'onde inférieure à 400 nm
- De rayonnement ultra-violet (UV) de longueur d'onde supérieure à 800nm

Sur Terre, l'atmosphère (via le dioxyde de carbone, l'ozone, la vapeur d'eau...) absorbe en grande partie les IR et les UV et un peu la lumière visible. Ainsi plus l'épaisseur d'atmosphère traversée est importante, plus la quantité d'énergie solaire reçue par le sol est faible.

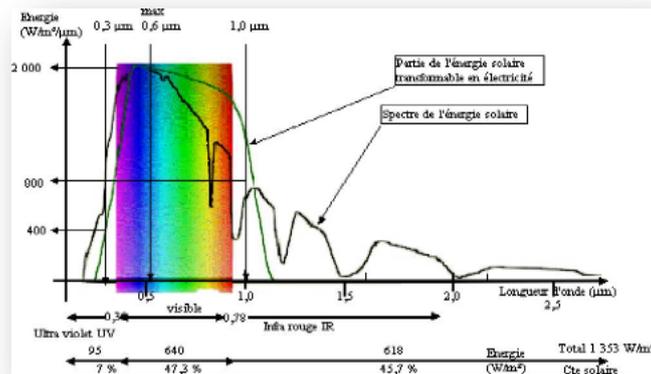


Figure 1.1 : Analyse spectrale du rayonnement global solaire

Quand on se rapproche des pôles, les rayons sont plus inclinés : la même quantité d'énergie se répartie sur une plus grande surface. C'est pourquoi le rayonnement solaire par unité de surface reçu diminue de l'équateur vers les pôles (ceci, avec l'inclinaison de l'axe de la Terre, est à l'origine du phénomène des saisons).

L'énergie solaire est également réduite:

- Par l'alternance des jours et des nuits ;
- Par la couverture nuageuse (celle-ci réduit à 50 % l'énergie solaire) ;
- par la variation saisonnière.

1.2.1 Normalisation

Les conditions standard de qualification des modules photovoltaïques sont:

- Un spectre AM 1.5.
- Un éclairement de 1000W/m².
- Une température de 25°C.

Les constructeurs de panneaux solaires spécifient les performances de leur matériel dans les conditions normalisées citées ci-dessus (S.T.C. : Standard Test Conditions). [1]

1.3 Cellules photovoltaïques

Une cellule photovoltaïque est une diode, formée de deux couches de matériaux de semi-conducteur dopées de sorte que l'une conduise les charges négatives et l'autre, les charges positives. Ce phénomène crée un champ électrique permanent dans la cellule.

La structure la plus simple d'une cellule photovoltaïque comporte une jonction entre deux zones dopées différemment d'un même matériau (homo jonction p-n), ou entre deux matériaux différents

(hétéro structures), la moins épaisse étant soumise au flux lumineux. Chacune des régions est reliée à une électrode métallique au moyen d'un contact ohmique de faible résistance. [3]

Le principe de fonctionnement peut être décomposé en deux parties :

L'absorption de photons et la collecte des porteurs de charges créés.

La première étape de la conversion de la lumière en courant électrique est la génération au sein du semi-conducteur des porteurs de charges que sont les électrons libres et les trous.

1.3.1L'effet photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque » souvent abrégé par le sigle « PV », a été formé à partir des mots « photo » un mot grec signifiant lumière et « Volta » le nom du physicien italien Alessandro Volta qui a inventé la pile électrochimique en 1800. L'effet photovoltaïque permet la transformation de l'énergie lumineuse en électricité. Il consiste à utiliser les photons pour libérer les électrons et créer une différence de potentiel entre les bornes de la cellule qui génère un courant électrique

Continu [2].

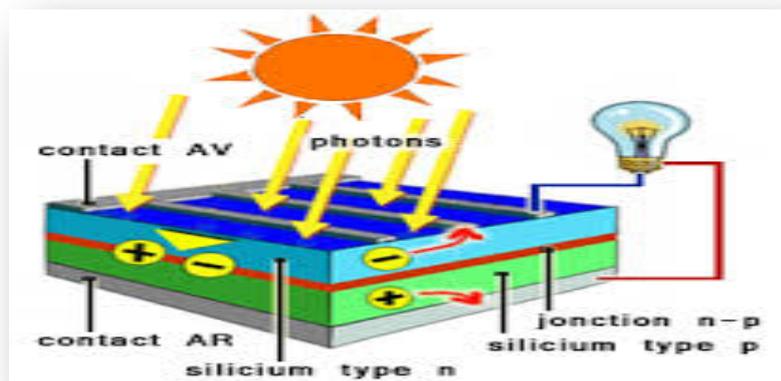


Figure1.2: Schéma d'une jonction PN

Schématiquement, un photon de lumière incidente permet sous certaines circonstances de mettre en mouvement un électron, produisant ainsi un courant électrique.

1.3.2Historique

Anné 1767:Le scientifique suisse Horace de Saussure a été reconnu pour avoir construit le premier capteur solaire, utilisé plus tard par Sir John Herschel pour cuire des aliments pendant son Afrique du Sud expédition dans les années 1830 [1]

Anné 1816:Le 27 septembre 1816, Robert Stirling a demandé un brevet pour son économiseur à la chan cellerie d'Édimbourg, en Écosse. Par métier, Robert Stirling était en fait un ministre de l'Église d'Écosse et il a continué à donner des services jusqu'à il avait quatre-vingt-six ans! Mais, pendant

son temps libre, il a construit des moteurs thermiques dans son atelier à domicile. Lord Kelvin a utilisé l'un des modèles de travail pendant ses cours universitaires. Ce moteur a ensuite été utilisé dans le système parabole

Stirling, c'est un technologie solaire thermique électrique qui concentre l'énergie thermique du soleil afin de produire de l'énergie.

Anné1839:Le scientifique français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque tout en expérimenter avec une cellule électrolytique composée de deux électrodes métalliques placées dans une solution conductrice d'électricité - la production d'électricité augmentait lorsqu'exposé à la lumière.

Années 1860:Le mathématicien français August Mouchet a proposé une idée pour la vapeur solaire moteurs. Au cours des deux décennies suivantes, lui et son assistant, Abel Pifre, ont construit les premiers moteurs à énergie solaire et les a utilisés pour une variété d'applications. Celles-ci les moteurs sont devenus les prédécesseurs des collecteurs paraboliques modernes.

Anné 1873:Willoughby Smith a découvert la photoconductivité du sélénium.

Anné 1876 :William Grylls Adams et Richard Evans Day découvrent que le sélénium produit de l'électricité lorsqu'il est exposé à la lumière. Bien que les cellules solaires au sélénium soient tombées en panne pour convertir suffisamment de lumière solaire pour alimenter les équipements électriques, ils ont prouvé qu'un un matériau solide pourrait transformer la lumière en électricité sans chaleur ni pièces mobiles.

Anné 1880:Samuel P. Langley, invente le bolomètre, qui est utilisé pour mesurer la lumière les étoiles les plus faibles et les rayons de chaleur du soleil

Anné 1883:Charles Fritts, un inventeur américain, a décrit les premières cellules solaires fabriquées à partir de plaquettes de sélénium.

Anné1887:Heinrich Hertz a découvert que la lumière ultraviolette altérait la tension la plus basse capable de faire sauter une étincelle entre deux électrodes métalliques.

Anné 1891:L'inventeur de Baltimore, Clarence Kemp, a breveté le premier solaire commercial chauffe-eau Centre solaire. [2]

Anné 1904 :Wilhelm Hallwachs a découvert qu'une combinaison de cuivre et d'oxyde cuivreux est photosensible.

Anné 1905 :Albert Einstein a publié son article sur l'effet photoélectrique (Avec un article sur sa théorie de la relativité).

Anné 1908 : William J. Bailey de la Carnegie Steel Company invente un capteur solaire avec des bobines de cuivre et une boîte isolée — en gros, c'est la conception actuelle.

Anné 1914 :L'existence d'une couche barrière dans les dispositifs photovoltaïques a été notée.

Anné 1918 :Le scientifique polonais Jan Czochralski a développé un moyen de développer un monocristal silicium [3]

Anné 1921 :Albert Einstein remporte le prix Nobel pour ses théories (recherche et technologie de 1904 papier cal) expliquant l'effet photoélectrique.

Anné 1932 :Audobert et Stora découvrent l'effet photovoltaïque du sulfure de cadmium (CdS).

Anné 1953 :Le Dr Dan Trivich Wayne State Université, fait la première théorie calculs des rendements de divers matériaux de bande interdite différente Largeurs basées sur le spectre du soleil.

Anné 1954 : La technologie photovoltaïque est née aux États-Unis lorsque Daryl Chapin, Calvin Fuller et Gerald Pearson développent la cellule photovoltaïque au silicium (PV) à Bell Labs - la première cellule solaire capable de convertir suffisamment d'énergie solaire en puissance pour faire fonctionner l'équipement électrique de tous les jours. Laboratoires téléphoniques de Bell a produit une cellule solaire au silicium avec une efficacité de 4% et a ensuite atteint 11%

Efficacité. [4]

Anné 1955 :Western Electric a commencé à vendre des licences commerciales pour le photovoltaïque au silicium (PV)

les technologies. Les premiers produits à succès comprenaient un billet d'un dollar alimenté par PV des changeurs et des appareils qui décodaient les cartes perforées et les bandes.

Anné 1947 : Les bâtiments solaires passifs aux États-Unis étaient en demande, comme un résultat de la rareté de l'énergie pendant la Seconde Guerre mondiale prolongée, que Libbey-Owens-Ford Glass Company a publié un livre intitulé Your Solar House, qui décrit le quarante-neuf des plus grands architectes solaires du pays.[5]

Anné 1916 :Robert Millikan a fourni une preuve expérimentale de l'effet photoélectrique.

Milieu des années 50.

L'architecte Frank Bridgers a conçu le premier immeuble de bureaux commerciaux au monde en utilisant le chauffage solaire de l'eau et la conception passive. Ce système solaire a été fonctionné depuis cette époque et le bâtiment Bridgers-Paxton est maintenant dans le registre historique national en tant que premier bureau chauffé à l'énergie solaire au monde bâtiment.

Anné 1956 :William Cherry, US Signal Corps Laboratories, s'approche de Paul des RCA Labs Rappaport et Joseph Loferski sur le développement de cellules photovoltaïques pour satellites en orbite proposés.

Anné 1957 :Hoffman Electronics a réalisé des cellules photovoltaïques à 8% d'efficacité.

Anné 1958 :T. Mandel Korn, US Signal Corps Laboratoires, fabrique du silicium n-on-p

les cellules photovoltaïques (d'une importance cruciale pour les cellules spatiales; plus résistantes aux radiations).

Anné 1958 :Hoffman Electronics réalise 9% de cellules photovoltaïques efficaces.

Anné 1958 :Le satellite spatial Vanguard I a utilisé un petit réseau (moins d'un watt) pour alimenter ses radios. Plus tard cette année-là, Explorer III, Vanguard II et Spoutnik-3 ont été lancés avec des systèmes photovoltaïques à bord. Malgré des tentatives hésitantes de commercialiser la cellule solaire au silicium dans les années 50 et 60, elle a été utilisée avec succès dans l'alimentation des satellites. Il est devenu la source d'énergie acceptée pour applications spatiales et le reste aujourd'hui. [6]

Anné 1959 :Hoffman Electronics atteint 10% d'efficacité, disponible dans le commerce Cellules photovoltaïques. Hoffman apprend également à utiliser un contact de réseau, ce qui réduit la résistance série de manière significative.

Anné 1959 :Le 7 août, le satellite Explorer VI est lancé avec un réseau photovoltaïque de 9600 cellules (1 cm x 2 cm chacune). Puis, le 13 octobre, le satellite Explorer VII est lancé.

Anné 1960 :Hoffman Electronics réalise 14% de cellules photovoltaïques efficaces.

Anné 1960 :Fondation de Silicon Sensors, Inc., de Dodgeville, Wisconsin. Il commence à produire cellules photovoltaïques au sélénium et au silicium.

Anné 1962 :Bell Telephone Laboratories lance le premier satellite de télécommunications, la Telstar (puissance initiale 14 watts).

Anné 1963 :Sharp Corporation réussit à produire du photovoltaïque au silicium pratique modules.

Anné 1963 :Le Japon installe un générateur photovoltaïque de 242 watts sur un phare, le plus grand est le tableau à ce moment-là.

Anné 1964 :La NASA lance le premier vaisseau spatial Nimbus - un satellite propulsé par un 470 watts champ photovoltaïque. [7]

Anné 1965 :Peter Glaser conçoit l'idée de la centrale solaire par satellite. Pour plus Informations, voir le dossier de référence du DOE,[8]

Anné 1966 :La NASA lance le premier Observatoire astronomique en orbite, propulsé par un Réseau photovoltaïque de 1 kilowatt, pour fournir des données astronomiques dans l'ultraviolet et les longueurs d'onde des rayons X filtrées par l'atmosphère terrestre.

Anné 1969 :Le four solaire Odeillo, situé à Odeillo, en France, a été construit.

Cela comprenait un miroir parabolique à 8 étages.

ont commencé à être perçus comme des applications sensées dans des endroits reculés les services publics connectés ne pouvaient pas exister à un prix abordable.

Anné 1972 :Les Français installent un système photovoltaïque au sulfure de cadmium (CdS) pour faire télévision éducative dans une école de village au Niger.

Anné 1973 :L'Université du Delaware construit « Solar One », l'une des premières résidences alimentées par tovoltaic (PV). Le système est un hybride PV / thermique. Les réseaux intégrés au toit ont fourni une puissance excédentaire via un compteur spécial au service public pendant la journée et acheté de l'électricité auprès du service public la nuit

Anné 1976 :Le NASA Lewis Research Center commence l'installation de 83 systèmes photovoltaïques sur tous les continents sauf en Australie. Ces systèmes offrent une telle diversité applications comme la réfrigération des vaccins, l'éclairage des salles, l'éclairage des cliniques médicales,

Communications, pompage de l'eau, meunerie et télévision en classe.

Le Centre a achevé le projet en 1995, y travaillant de 1976 à 1985, puis à nouveau de 1992 à 1995.

Anné 1976 :David Carlson et Christopher Wronski, RCA Laboratories, fabriquent d'abord cellules photovoltaïques en silicium amorphe.

Anné 1977 :La production manufacturière photovoltaïque totale dépasse 500 kilowatts.

Anné 1978 : Le Lewis Research Center de la NASA consacre un photovoltaïque (PV) de 3,5 kilowatts système qu'il a installé sur la réserve indienne de Papagos située dans le sud Arizona — le premier système PV de village au monde. Le système est utilisé pour fournir pour le pompage de l'eau et l'électricité résidentielle dans 15 foyers jusqu'en 1983, date à laquelle le réseau le pouvoir a atteint le village. Système PV était alors dédié au pompage l'eau d'un puits communautaire.

Anné 1980 :ARCO Solar devient la première entreprise à produire plus de 1 mégawatt de Modules photovoltaïques en un an.

Anné 1980 :À l'Université du Delaware, la première cellule solaire à couche mince dépasse 10% d'efficacité en utilisant du sulfure de cuivre / sulfure de cadmium.

Anné 1981 :Paul Mac Craey construit le premier avion à énergie solaire - le Solar Challenger [9]

Anné 1982 :La première centrale photovoltaïque à l'échelle du mégawatt est mise en service à Hisperia, Californie. Il a un système de capacité de 1 mégawatt, développé par ARCO Solar

Anné 1982 :L'Australien Hans Tholstrup conduit la première voiture à énergie solaire[10]

Anné 1982 :Le Département américain de l'énergie, avec un consortium industriel, commence exploiter Solar One, un projet de démonstration de récepteur central de 10 mégawatts.[11]

Anné 1982 :Volkswagen d'Allemagne commence à tester des panneaux photovoltaïques montés sur les toits des wagons de la station Casher, générant 160 watts pour le système d'allumage.

Anné 1983 :Solar Design Associates complète une maison autonome de 4 kilowatts à

la vallée de la rivière Hudson.

Anné 1984 :Le Sacramento Municipal Utility District met en service son premier 1 mégawatt installation de production d'électricité photovoltaïque.

Anné 1986 : La plus grande installation solaire thermique au monde, située à Kramer Junction

Anné 1988 :Le Dr Alvin Marks reçoit des brevets pour deux technologies d'énergie solaire qu'il développé: Lepcon et Lumeloid. Lepcon

Anné 1991 :Le président George Bush redésigne le solaire du département américain de l'Énergie Institut de recherche sur l'énergie en tant que Laboratoire national des énergies renouvelables.

Anné 1992 :Un système de plat prototype de 7,5 kilowatts utilisant une membrane étirée avancée concentrateur devient opérationnel.

Anné 1993 : Pacific Gas & Electric achève l'installation du premier réseau soutenu par le réseau système photovoltaïque à Kerman, en Californie

Anné 1994 :Le premier générateur solaire parabolique utilisant un moteur Stirling à piston libre est relié à un réseau électrique public.

Anné 1994 :Le Laboratoire national des énergies renouvelables développe une cellule solaire le phosphore de gallium indium et l'arséniure de gallium - qui devient le premier à dépasser 30% d'efficacité de conversion.

Anné 1996 :L'avion à énergie solaire le plus avancé au monde, Icare, a survolé Allemagne. [12]
« Avion solaire de l'Université de Stuttgart »

Anné 1996 :Le Département américain de l'énergie, avec un consortium industriel, commence exploitation de Solar Two - une mise à niveau de son énergie solaire à concentration [13]

Anné 1998 :Subhendu Guha, un scientifique réputé pour son travail de pionnier dans le silicium amorphe, a mené l'invention des bardeaux solaires flexibles, un matériau de toiture et l'état de l'art

Anné 1999 :Spectrolab, Inc. et le National Renewable Energy Laboratory développent un cellule solaire photovoltaïque qui convertit 32,3% de la lumière solaire qui la frappe en électricité.

Anné 1999 :Le Laboratoire national des énergies renouvelables atteint un nouveau record d'efficacité pour cellules solaires photovoltaïques à couches minces.

Anné 1999 :La capacité photovoltaïque installée mondiale cumulée atteint 1 000 mégawatts.

Anné 2000 :First Solar commence la production à Perrysburg, Ohio, au plus grand usine de fabrication photovoltaïque d'une capacité de production estimée suffisamment de panneaux solaires chaque année pour produire 100 mégawatts d'électricité.

Anné 2000 :À la Station spatiale internationale, les astronautes commencent à installer des panneaux solaires sur quel sera le plus grand réseau d'énergie solaire déployé dans l'espace

Anné 2000 :Sandia National Laboratories développe un nouvel onduleur pour les systèmes solaires électriques cela augmentera la sécurité des systèmes lors d'une panne de courant.

Anné 2000 :Deux nouveaux modules solaires à couches minces, développés par BP Solaire, cassent le précédent dossier de performance.

la puissance la plus élevée de tous les films minces module dans le monde.

2000 :Une famille de Morrison, au Colorado, installe un système électrique solaire de 12 kilowatts sur son home [14]

Anné 2001 :Home Depot commence à vendre des systèmes d'énergie solaire résidentiels dans trois de ses magasins

Anné 2001 :Avion à énergie solaire de la NASA - Helios établit un nouveau record du monde pour les avions propulsés

Anné 2001 :L'Agence nationale de développement spatial du Japon, ou NASDA, annonce des plans pour développer un système d'énergie solaire par satellite

Anné 2001 :Terra Sun LLC développe une méthode unique d'utilisation de films holographiques pour concentrer la lumière du soleil sur une cellule solaire. 2001

Power Light Corporation met en ligne à Hawaï le plus grand hybride du monde système qui combine la puissance de l'énergie éolienne et solaire.

Anné 2001 :British Petroleum et BP Solar annoncent l'ouverture d'une station-service est le premier magasin américain « BP Connect »

Anné 2002 :Union Pacific Railroad installe 350 lanternes de triage à signal bleu, qui intègrent technologie de diode électro luminescente (LED) à économie d'énergie avec des cellules solaires, au nord Platt

Anné 2002 :ATS Automation Systèmes d'outillage Inc. au Canada commence à commercialiser une méthode innovante de production de cellules solaires, appelée technologie solaire sphérique

1.2.3Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est le suivant :

Les « grains » de lumière qu'on appelle photons, en pénétrant très légèrement dans le silicium, déplacent quelques électrons du métal.

Le métal semi-conducteur ne permettant le déplacement des électrons que dans un sens, les électrons déplacés par la lumière doivent passer par le circuit extérieur pour revenir à leur place, ce qui engendre un courant. [3].

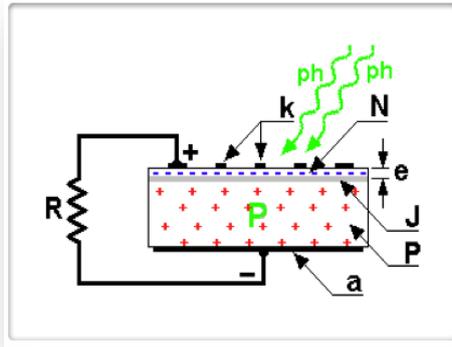


Figure1.3: une cellule photovoltaïque est de convertir de l'énergie lumineuse en énergie électrique.

N : Couche supérieure, composée de silicium dopé par un élément contenant plus d'électrons que lui.

Contient donc plus d'électrons qu'une couche de silicium pur.

Couche appelée semi-conducteur de type N.

P : Couche inférieure composée de silicium dopé par un élément contenant moins d'électrons que lui.

Contient donc moins d'électrons qu'une couche de silicium pur.

Couche appelée semi-conducteur de type P.

J : jonction entre les zones N et P. Au milieu de ces deux matériaux, il va se former une zone neutre, appelée Zone de Charge d'Espace (ZCE). Cette zone étant neutre, aucun courant ne peut la traverser.

K : la zone N est couverte par une grille métallique qui sert de cathode (électrode de sortie du courant).

a : plaque métallique recouvrant l'autre face du **crystal** (qui appartient aux cristaux: variété de verre pur, limpide et très résistant. Ici, le silicium), qui sert d'anode (électrode d'entrée du courant).

e : épaisseur de N (égale à quelques millièmes de mm).

R : résistance.

ph : photons : particule élémentaire de la lumière

1.2.4 Technologie d'une cellule photovoltaïque :

Il existe plusieurs types de Technologie

- **1ère génération: Silicium cristallin (mono et poly) :**

Cette génération de cellule repose sur les wafers (fine tranches) de silicium cristallin. Ces wafers sont sciés dans des lingots de silicium. Ces lingots sont le résultat d'un processus de purification de manière à obtenir un matériau contenant 99.99999% de Silicium.

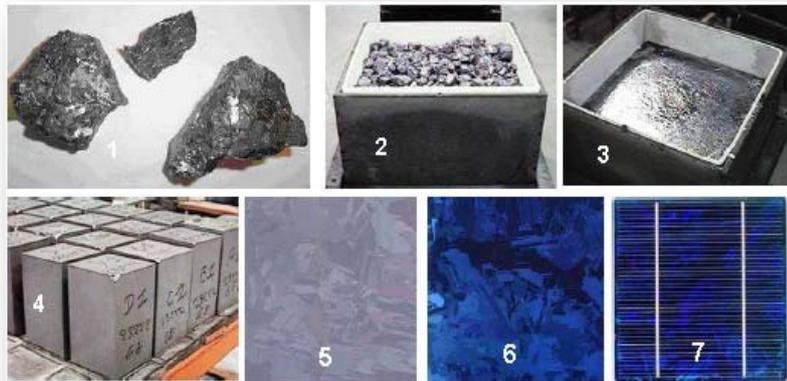


Figure 1.4 : Etape de fabrication des cellules

- (1) minerai de Silicium
- (2) raffinage (pour augmenter la pureté) –
- (3) Silicium en fusion donnant des lingot
- (4) après solidification
- (5) wafer obtenu par sciage du lingot
- (6) traitement de surface par procédés physico chimiques
- (7) cellule finie avec électrodes

Les cellules cristallines se subdivisent en 2 catégories : mono- et poly- cristalline selon le type de structure. Ces deux types de cellules proviennent de procédé de purification et de solidification différents (processus Czochralski (Cz) et processus Siemens). Les procédés de purification Cz et Siemens ont des structures d'approvisionnement différentes et sont généralement réalisées par des industries différentes. [4].

Les cellules monocristallines se distinguent à leurs coins cassés et à leur aspect uniforme. Les cellules poly-cristallines ont quant à elles un aspect plus irisé provenant de l'orientation des différents réseaux cristallins par rapport au plan de coupe.

- 2ème génération: CdTe, CIS/ CIGS, silicium amorphe et microcristallin

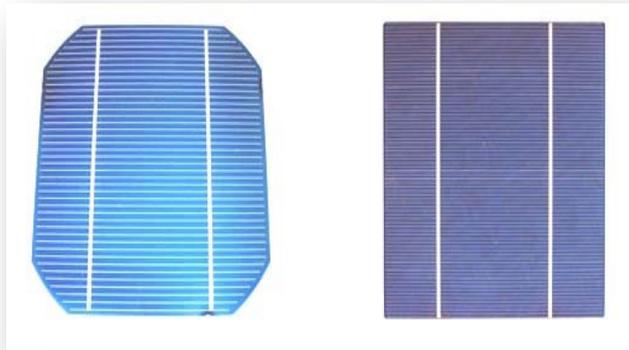


Figure 1.5: cellule mono cristalline et poly cristalline

Cette génération de cellule repose sur la déposition de matériaux semi-conducteurs en couches minces (thin film). Ces matériaux sont déposés par des procédés tels que PE-CVD (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition) sur un substrat. L'épaisseur de la couche varie entre quelques nanomètres à des dizaines de micromètres. Ces technologies qui étaient initialement chères étaient réservées aux applications spatiales (en raison de leur poids par watt crête plus faible) et aux technologies de concentration. Avec l'augmentation des volumes de production, le prix de revient de ces technologies a baissé pour devenir compétitif avec les technologies cristallines de la première génération. [4]

Parmi les technologies en couches minces qui sont exploitées industriellement (production de masse), on distingue :

CdTe : Cadmium Telluride (telluride de cadmium)

CIS / CIGS: Copper Indium Gallium Selenide

Silicium en couche mince : silicium amorphe α Si et microcristallin



Figure 1.6: modules verre-verre au Telluride de Cadmium

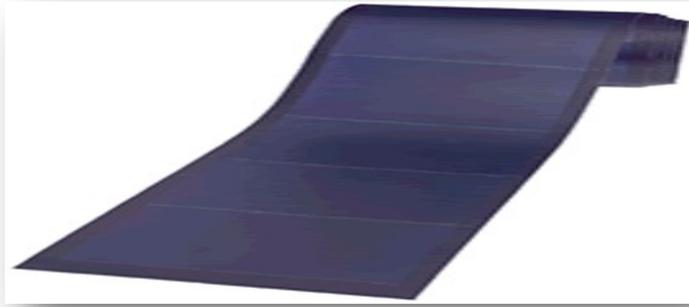


Figure 1.7: module photovoltaïque souple au silicium amorphe α Si triple jonction



Figure 1.8 : façade en CIGS au Pays de Galles



Figure1.9 : module combinant technologie microcristalline et amorphe

3 Technologies photo-électro-chimiques (Dye Sensitised Cell et Organic PV)

Les cellules photovoltaïques organiques sont des cellules photovoltaïques dont au moins la couche active est constituée de molécules organiques. Il en existe principalement deux types:

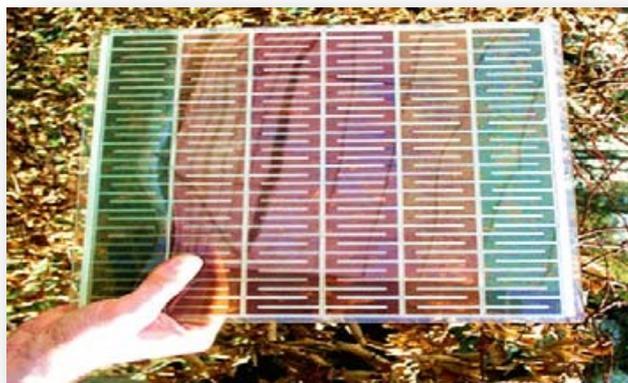
- Les cellules photovoltaïques organiques moléculaires

- Les cellules photovoltaïques organiques en polymères

Apparues dans les années 1990, ces technologies ont pour but de réduire le coût de production de l'électricité. Les cellules photovoltaïques organiques bénéficient du faible coût des semi-conducteurs organiques et des simplifications potentielles dans le processus de fabrication. Elles offrent la perspective d'une production en continu (roll-to-roll) qui pourrait réduire drastiquement le prix de revient des panneaux solaires.



Figure 1.10 : sac à dos incorporant un module de technologie organique DSC



Pratiquement, ces technologies ne sont utilisées commercialement aujourd'hui que dans le secteur de l'électronique de consommation (chargeur de GSM/ baladeur MP3) où la durée de vie de la cellule et du produit associé sont approximativement égales (2 ans). En améliorant la durée de vie ou en réduisant les coûts de production, d'autres applications devront voir le jour dans les années à venir [5]

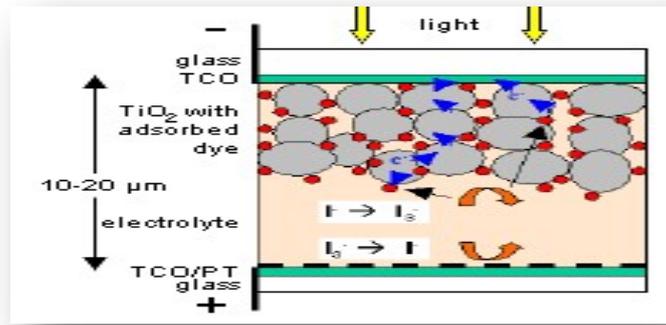


Figure 1.11: Cellule Dye Sensitized Cell - coupe explicative

Encore au stade de recherche expérimentale, le record de rendement est compris entre 4 et 5% en laboratoire. Avant une possible commercialisation, des avancées concernant l'efficacité et l'encapsulation doivent encore être réalisés

	Silicium amorphe	Telluride de Cadmium	CI(G)S	Silicium amorphe / microcristallin	monocristallin	poly cristallin
efficacité de cellule aux STC *	5 - 7 %	8 - 11 %	7 - 11 %	8%	16 - 19 %	14 - 15%
efficacité de module aux STC					13 - 15 %	12 - 14%
Surface requise pour obtenir 1 kWc	15 m ²	11 m ²	10 m ²	12 m ²	~ 7 m ²	~ 8 m ²

* STC : conditions de test standard 1000 W/m², 25°C

Figure 1.12 : Efficacités typiques des différentes technologies PV utilisées commercialement (source Photon International Modules Survey 2009)

1.2.5 Fabrication des panneaux photovoltaïques à cellules cristallines

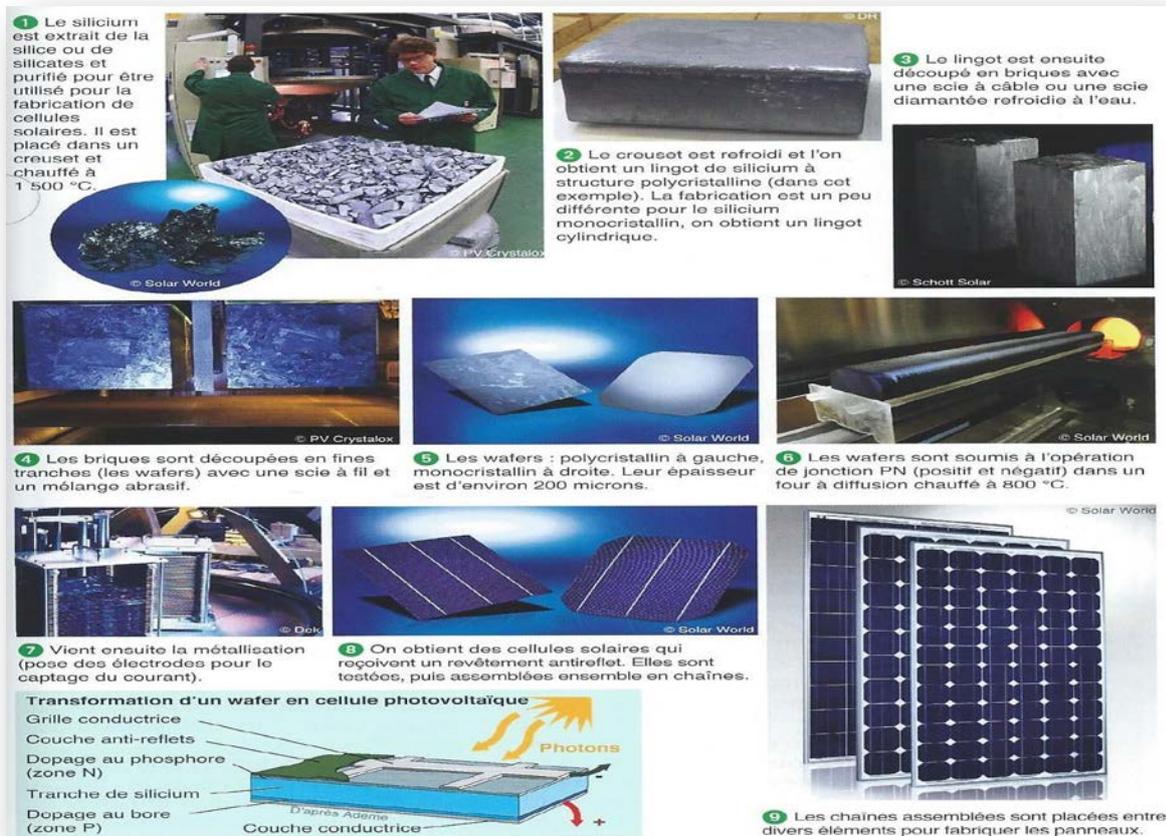


Figure 1.13 : Fabrication des panneaux photovoltaïques à cellules cristallines

1.4 Caractéristiques de la cellule photovoltaïque

- **Caractéristique courant-tension :**

C'est une caractéristique fondamentale de la cellule solaire, définissant cet élément comme générateur. Elle est identique à celle d'une jonction P-N avec un sens bloqué, mais décalé le long de l'axe du courant d'une quantité directement proportionnelle à l'éclairement. Elle se trace sous un éclairement fixe et une température constante figure (14).

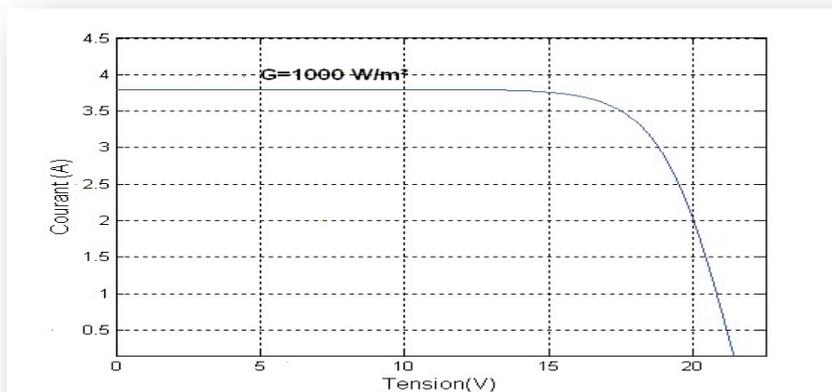


Figure 1.14 : Caractéristique I(V) d'une cellule solaire, T=25°C.

Zone de fonctionnement :

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairement et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement; seule la courbe I (V) est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque. La figure (2.4) représente trois zones essentielles [7] :

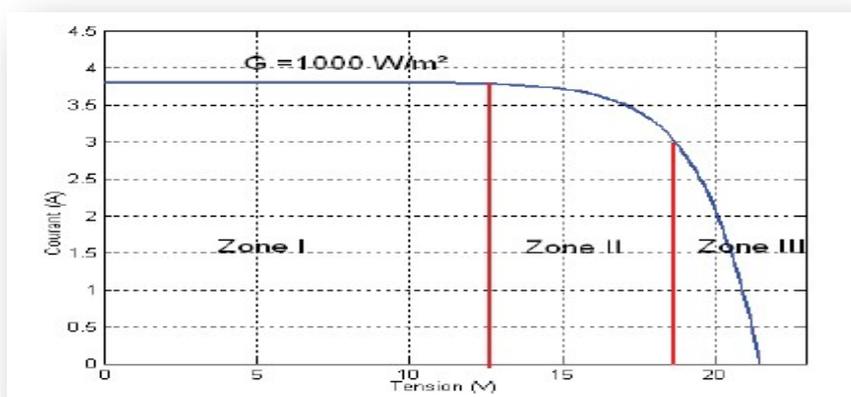


Figure 1.15. Les différentes zones de la caractéristique I(V), T=25°C.

La zone(I): où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.

La zone (II) : correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.

La zone (III) : qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension.

- **Caractéristique Puissance-Tension**

La puissance débitée par le module photovoltaïque dépend du point de fonctionnement de cette dernière ; c'est le produit de l'intensité de courant et de la tension entre ses bornes figure (16). Le point « M » représente la puissance maximale débitée par le module.

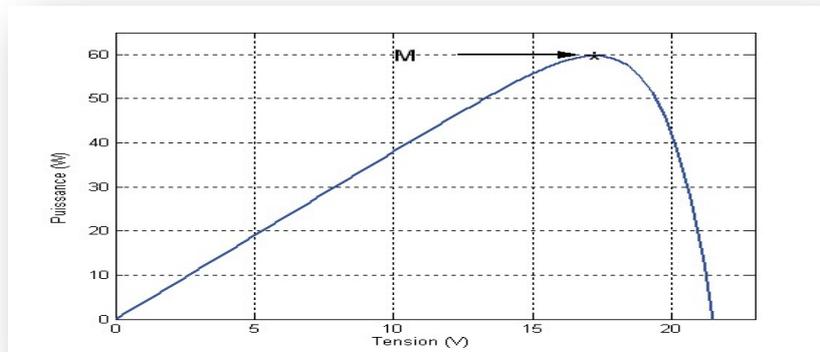


Figure 1.16. Caractéristiques P (V) d'un panneau solaire, T=25°C [10]

- **Facteur de forme**

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique I(V) pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV :

c'est le facteur de remplissage ou fill factor (FF).

Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P et la puissance formée par le rectangle $I_{CC} \cdot V$. Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également.

Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales.

Il est défini par la relation suivante :

$$FF = P_{max} / V_{co} * I$$

Le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque peuvent être schématisées ci-dessous

Pour une cellule idéale l'équation de courant, est :

$$I_{out}(V_{out}) = I_{ph}(\varphi) - I_d(V)$$

Ou :

I_{out} : Courant fournie par la cellule[A] ;

V_{out} : Tension aux bornes de la jonction[V] ;

$I_{ph}(\varphi)$: Courant produit par la photopile, ce courant est proportionnel au flux lumineux (φ)[A].

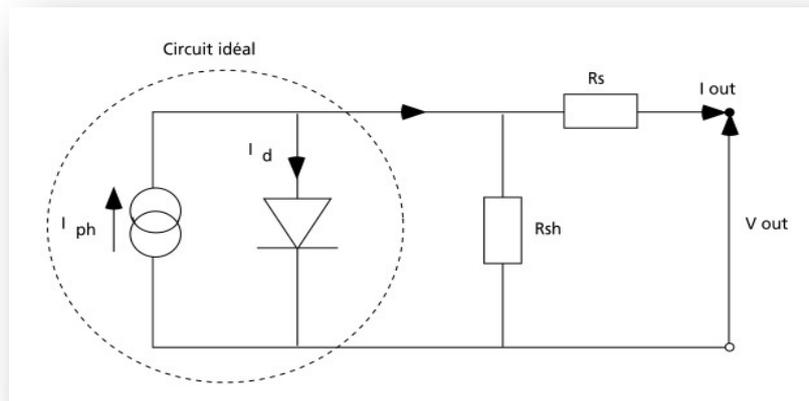


Figure1.17: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

1.5 Différents types de défauts :

Généralement les générateurs PV sont considérés fiables par rapport aux autres systèmes, mais comme tous procédés, un système PV peut être exposé à plusieurs pannes provoquant le dysfonctionnement de ce dernier, plusieurs études ont constaté que la fiabilité des systèmes PV est fortement dépendante du matériel utilisé pour la construction des panneaux PV, de la température, de l'humidité et du rayonnement solaire. Un système PV peut avoir plusieurs défauts que ce soit les défauts de types construction, ou les défauts matériels et électriques causés par les conditions climatiques. A ce titre, nous pouvons citer le défaut le plus couramment rencontré dans un générateur PV qui est le défaut d'ombrage partiel. [8]

1.5.1 Les défauts actionneurs :

Les défauts actionneurs agissent au niveau de la partie opérative en détériorant le signal d'entrée du système [9].

Ils correspondent à une perte totale ou partielle d'un actionneur.

La perte totale d'un actionneur arrive lorsque celui-ci reste collé sur une position entraînant une incapacité à commander.

Les défauts actionneurs partiels réagissent de manière similaire au régime nominal mais en partie seulement, ce qui entraîne une certaine dégradation dans leur action sur le système. 1.3.1.2

1.5.2 Les défauts capteurs :

Ce type de défaut est la cause d'une mauvaise image de l'état physique du système.

Un défaut capteur partiel produit un signal avec plus au moins d'adéquation avec la vraie valeur de la variable mesurée. Il se traduit par une réduction de la valeur affichée par rapport à la vraie valeur.

Un défaut capteur total produit une valeur qui n'est pas en rapport avec la grandeur à mesurer.

1.5.3 Les défauts composants ou systèmes :

Ce type de défaut provient du système lui-même, Il résulte de l'altération d'un composant du système réduisant ses capacités d'effectuer une tâche [7].

1.5.4 Défaut abrupt :

Il est caractérisé par une discontinuité brutale de l'évolution temporelle d'une variable du procédé.

Il provoque un écart dans l'évolution de la variable en question par rapport à l'évolution normale.

1.5.5 Défaut graduel :

Il conduit à une divergence lente et continue des variables concernées. C'est un défaut difficile à détecter.

1.5.6 Défaut intermittent :

Il représente une particularité des défauts précédents avec des départs et retours successifs aux valeurs normales. Il est souvent provoqué par des faux contacts.

1.6 Le système photovoltaïque :

Bien que fondamental dans la chaîne que représente un système, le module photovoltaïque à lui seul ne peut pas grand-chose : pour répondre à un besoin défini, il faut en fait l'associer étroitement à un système complet correspondant à une application bien spécifique.

Un système photovoltaïque sera donc constitué du générateur précédemment décrit, généralement associé à l'un ou plusieurs des éléments suivants:

- Un système d'orientation ou de suivi (rencontré assez rarement sous nos latitudes),
- Une gestion électronique (stockage, mise en forme du courant, transfert de l'énergie),
- Un stockage palliant la nature aléatoire de la source solaire,
- Un convertisseur DC/AC
- Une charge en courant continu basse tension ou en courant alternatif standard.

La Figure 18 représente symboliquement les divers éléments du système le plus général. Dans la pratique, bien sûr, les systèmes utilisent les éléments appropriés au type de charge et aux conditions locales dans notre cas la charge est un ascenseur.

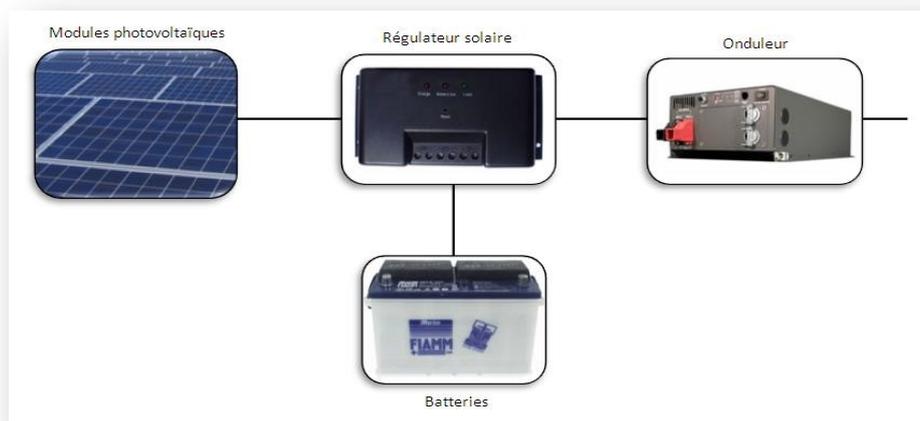


Figure1.18: Schéma synoptique décrivant le système photovoltaïque le plus général

1.6.1 Systèmes photovoltaïques avec stockage électrochimique :

- **Les accumulateurs électrochimiques :**

Il y a nécessité de stockage électrique chaque fois que la demande électrique est décalée dans le temps par rapport à l'apport solaire. Une demande énergétique est caractérisée par une courbe de charge; celle-ci peut être constante au cours de la journée et variable au cours de l'année. Elle peut être totalement aléatoire, mais avec des périodes de maxima et de minima statistiquement connues. Dans tous les cas on peut tout de même ramener la puissance moyenne consommée sur une période donnée en watts permanents équivalents [10].

- **Utilisation des accumulateurs dans les systèmes solaires :**

L'utilisation des accumulateurs dans les systèmes solaires est conditionnée par les caractéristiques de ces derniers, qui sont les suivantes :

Stockage - tampon

Dans les systèmes solaires avec batterie, on utilise les accumulateurs en tampon, autrement dit le générateur solaire et l'utilisation restent branchée en permanence sur la batterie.

Durée de stockage

Le stockage électrique caractérisé par sa capacité (en Ah) détermine directement la durée du stockage si on rapporte cette énergie stockée à l'énergie moyenne consommée.

Les durées de stockage peuvent être très variables : quotidiennes (par exemple pour les pays à fort ensoleillement) ou de plusieurs jours ou semaines (par exemple pour les pays à plus faible ensoleillement).

La capacité du stockage est déterminée par le dimensionnement du système en fonction de critères techniques et économiques.

Conditions d'exploitation des accumulateurs.

Le cycle imposé aux accumulateurs sera directement lié à la capacité de stockage et à l'apport énergétique solaire. Pour un stockage journalier, l'accumulateur sera soumis à un grand nombre de micro cycles liés à l'alternance jour / nuit, beau temps / mauvais temps. Pour un stockage saisonnier, l'accumulateur sera soumis à des cycles plus profonds liés à l'alternance des saisons auxquels seront superposés des microcycles journaliers.

Caractéristiques souhaitées

Compte tenu des conditions d'exploitation des accumulateurs dans les systèmes solaires, on recherchera des éléments à faible auto décharge (< 5%), cyclage profond, faible maintenance, durée de vie supérieure à 5 ans.

Actuellement, les accumulateurs les mieux adaptés aux systèmes PV sont les éléments au plomb. Pour certaines applications spécifiques (miniaturisation, robustesse, etc....) on utilise le couple Cadmium - Nickel au prix des inconvénients cités précédemment.

Conditions de charge.

La batterie est branchée en permanence sur le générateur solaire. La surcharge est évitée en utilisant un régulateur de charge qui maintient la batterie dans un état voisin de la pleine charge. Cette condition de fonctionnement dite "batterie flottante" ou "floating" est obtenue en limitant la tension à une valeur constante de l'ordre de 2,25 V à 2,35 V par élément.

D'autre part, on augmentera considérablement la durée de vie si on limite la profondeur de décharge de la batterie. Différents systèmes électroniques sont envisageables pour limiter la charge et la décharge des accumulateurs, rôle généralement réalisé par le régulateur de charge associé.

1.6.2 Les panneaux photovoltaïques :

Un panneau solaire est un dispositif technologique énergétique à base de capteurs solaires thermiques ou photovoltaïques et destiné à convertir le rayonnement solaire en énergie thermique ou électrique. Elle est dite renouvelable, car sa source (le Soleil) est considérée comme inépuisable à l'échelle du temps humain. En fin de vie, le panneau photovoltaïque aura produit 20 à 40 fois l'énergie nécessaire à sa fabrication et à son recyclage.

1.6.3 Les accumulateurs électrochimiques :

Les accumulateurs électrochimiques sont des dispositifs destinés à stocker l'énergie électrique et à la restituer ultérieurement. C'est la modification chimique d'un mélange appelé "électrolyte" qui permet d'accumuler ou de restituer l'énergie électrique. Dans un accumulateur électrochimique, une électrode est l'endroit où ont lieu les réactions chimiques produisant (ou absorbant) les électrons qui

circulent dans le circuit électrique extérieur au générateur. Toute réaction qui implique un échange d'électron(s) peut être utilisée dans un générateur électrochimique. Le composé qui, pendant une réaction chimique perd des électrons, s'oxyde ou subit une oxydation. L'électrode où une oxydation se produit et appelée anode. Le composé qui absorbe des électrons se réduit ou subit une réduction. L'électrode où se passe une réduction est une cathode. Dans un générateur électrochimique, les électrons quittent l'anode vers le circuit extérieur et retournent au générateur par la cathode. [11]

En résumé, un générateur électrochimique élémentaire comprend au minimum :

- un contenant
- deux électrodes avec leurs contacts
- un électrolyte
- un séparateur

L'électricité étant produite par une réaction chimique, le courant cesse de circuler lorsque la matière active contenue dans au moins l'une des électrodes a été complètement utilisée. On dit que le générateur est déchargé. La quantité totale d'électricité que le générateur a fourni pendant la décharge est sa capacité, elle s'exprime par le produit du courant de décharge par le temps qu'a duré cette décharge.

On a :

$$C = I * t$$

où

C:la capacité

I :le courant (constant) et t, la durée de la décharge.

1.6.4 Régulation électronique de la charge

Un régulateur de charge appelé aussi contrôleur de charge, est un système ou appareil électronique fonctionnant de façon complètement automatique auquel sont raccordés le générateur (panneaux solaires, éolienne, etc.) la batterie ainsi que d'éventuels équipements ou composants de l'installation. [11]

Le régulateur de charge principale sert avant tout à contrôler l'état de la batterie. Il permet, en effet, d'assurer la charge complète de la batterie et prévient de tout risque de surcharge de celle-ci en stoppant l'alimentation de cette dernière lorsque cela s'avère nécessaire.

Ce mécanisme de régulation consiste à surveiller en permanence l'état de charge de la batterie.

Le régulateur coupe l'alimentation du générateur lorsque l'état de charge de la batterie atteint l'une des valeurs limites correspondant au déclenchement de la sécurité. Il existe plusieurs valeurs limites correspondant chacune à un type de protection différent : surcharge, décharge profonde, température de fonctionnement, court-circuit, etc.

Cette surveillance et cette protection permanente permettent ainsi de prolonger de façon importante les performances et la durée de vie de vos batteries.

Les régulateurs standards couramment utilisés sur le marché proposent en général un ensemble de protections dites "classiques" telles que : protection contre la surcharge, protection contre la décharge profonde, protection contre les court-circuit, protection du générateur, protection thermique (sonde), etc.

La plupart de ces régulateurs sont équipés de voyants ou témoins lumineux destinés à fournir un ensemble d'indications telles que :

l'état de charge de la batterie, l'état de fonctionnement du générateur, le mode de fonctionnement en cours, l'état des différentes protections, etc.

Les nouvelles générations de régulateurs "haut de gamme" quant à eux, sont de plus en plus perfectionnés et proposent des fonctionnalités plus nombreuses et de plus en plus évoluées

1.6.6 Onduleur :

Un onduleur est un dispositif permettant de transformer en alternatif une énergie électrique de type continue. Ils sont utilisés en électrotechnique pour :

-Soit fournir des tensions ou courants alternatifs de fréquence et amplitudes variables.

Ex: C'est le cas des onduleurs servant à alimenter des moteurs à courant alternatif devant tourner à vitesse variable par exemple (la vitesse est liée à la fréquence des courants qui traversent la machine).

-Soit fournir une ou des tensions alternatives de fréquence et d'amplitude fixes.

Ex: C'est le cas en particulier des alimentations de sécurité destinées à se substituer au réseau en cas de défaillance de celui-ci par exemple. L'énergie stockée dans les batteries de secours est restituée sous forme continue, l'onduleur est alors nécessaire pour recréer la forme de tension et fréquence du réseau. On distingue les onduleurs de tension et les onduleurs de courant, en fonction de la source d'entrée continue: source de tension ou source de courant.

La technologie des onduleurs de tension est la plus maîtrisée et est présente dans la plupart des systèmes industriels, dans toutes les gammes de puissance (quelques Watts à plusieurs MW). [13]

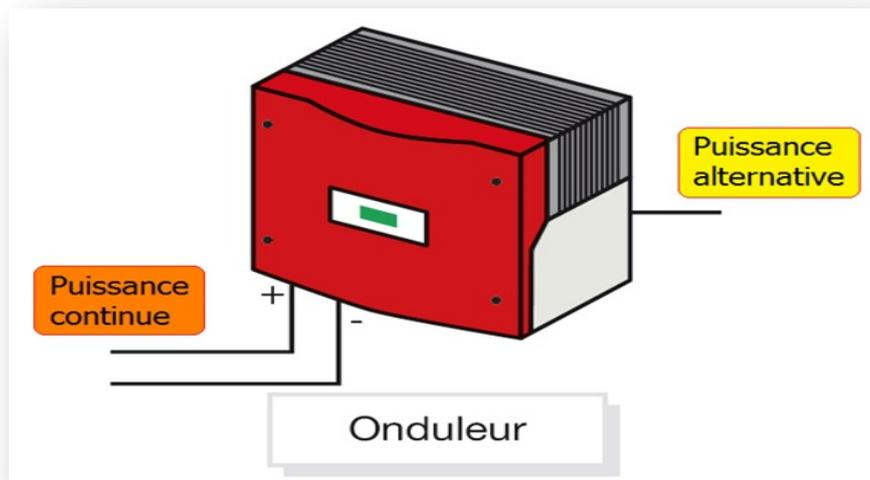


Figure1.19: Schéma synoptique d'Onduleur [13]

1.7Caractéristiques propres à un onduleur pour systèmes photovoltaïques :

Les onduleurs destinés aux systèmes photovoltaïques sont quelque peu différents des onduleurs classiques utilisés en électrotechnique, mais l'objectif de conversion AC*/DC* est le même. [14]

La principale caractéristique de l'onduleur PV est la recherche du meilleur point de fonctionnement du système. En effet, le générateur PV (ensemble de modules PV) a une courbe caractéristique IV non linéaire. Pour un éclairement et une température donnés, la tension en circuit ouvert ou à forte charge est à peu près constante (assimilable à une source de tension), tandis qu'en court-circuit ou à faible charge le courant est pratiquement constant (source de courant).

Le générateur n'est alors ni vraiment une source de tension ni vraiment une source de courant non plus. La tension de circuit ouvert est sensible à la température et diminue quand la température augmente. Le courant de court-circuit est quant à lui proportionnel à l'éclairement: augmente si l'éclairement augmente

1.8Différents types de systèmes photovoltaïques

1.8.1Les systèmes autonomes :

Ces systèmes photovoltaïques sont installés pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergie. Généralement, ces systèmes sont utilisés dans les régions isolées et éloignées du réseau. Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes ont les possibilités découplage 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. [15]

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 plupart 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.

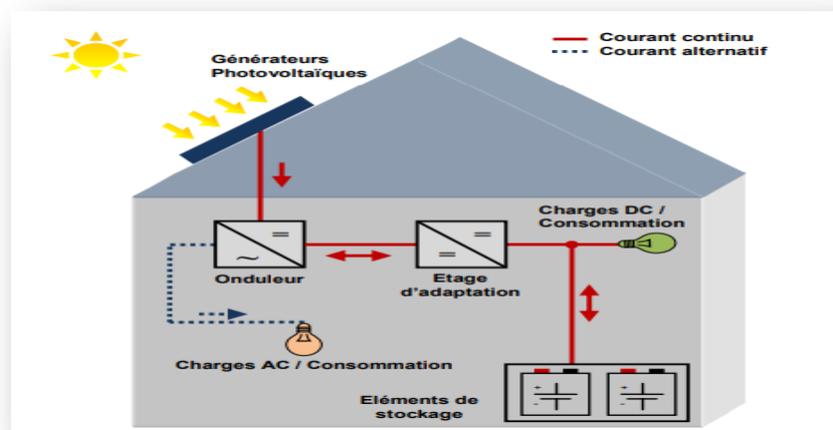


Figure1. 20 : Exemple de la structure d'un système PV isolé et autonome.

1.8.2 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 (CA) fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être convertie ensuite en courant continu (CC). 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. [15]

1.8.3 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 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 d'entretenir une batterie. Il est toujours possible d'utiliser ceux systèmes pour servir d'alimentation d'appoint lorsque survient une panne de réseau

Le contexte énergétique actuel fait que l'énergie photovoltaïque n'est pas concurrentielle face au prix de vente de l'électricité sur le réseau (quand celui-ci est présent). C'est pourquoi, face aux réglementations sur la réduction des émissions des gaz à effet de serre du protocole de Kyoto et de l'accord de Copenhague et à la réduction des ressources en énergie fossile [4], de nombreux pays ont mis en place des mesures économiques pour favoriser l'insertion des énergies renouvelables, dont le photovoltaïque. La mesure la plus courante de chacun des pays consiste à imposer au gestionnaire du réseau des tarifs d'achat incitatifs de l'énergie PV de sorte que celle-ci devienne concurrentielle par effet d'échelle. D'autres mesures consistent à subventionner directement le particulier sur le coût de l'investissement. Mais si l'énergie photovoltaïque doit se développer de façon durable dans le futur, seuls l'augmentation de rendement de conversion et simultanément la baisse des coûts des générateurs photovoltaïques dès leur conception pourront pérenniser cette filière.

1.9 Les étapes de dimensionnements d'un système photovoltaïque :

Les deux critères importants du dimensionnement optimal sont :

- La satisfaction d'une condition sur le comportement énergétique du système en termes d'autonomie ou de déficit autorisé, en effet l'utilisateur a la possibilité de définir au départ l'autonomie du système ou la satisfaction d'un certain taux de couverture pour la période la plus défavorable.

– L'équilibre du couple générateur/stockage. Ces deux critères cités précédemment ont le principal avantage de traduire ce que les utilisateurs pensent des systèmes photovoltaïques [16]

1.7 Les besoins en énergie électrique

Il s'agit d'estimer la consommation d'équipements supposés connus. L'objectif est d'obtenir la consommation totale moyenne par jour et par période (été, hivers, vacances...) L'énergie totale moyenne nécessaire chaque jour E (Wh/j) est la somme des consommations énergétiques des divers équipements constituant le système à étudier, à savoir la télévision, les lampes d'éclairage, les appareils électroniques, etc.... ;

Elle est donnée par la loi suivante [16]:

$$E = \sum E = E_i \quad (1.1)$$

Le temps moyen d'utilisation est plus délicat à cerner ;

Il faut le rapporter à :

- La saison,
- Le nombre d'occupants

1.7.1 L'énergie à fournir à l'onduleur et son utilisation

Lorsqu'un onduleur est utilisé, il alimente :

- Les consommations en 220 VCA de petites puissances (téléviseur, hi-fi, perceuse, mixeur...) (qu'on note X);
- Les consommations en 220V CA de longue durée ou de forte puissance tel que le réfrigérateur, le congélateur... (qu'on note Y);
- Et éventuellement l'éclairage (énergie noté W) ; Le rendement réel, moyen d'un onduleur bien conçu, de bonne qualité, dépend de son taux de charge. [16]

1.7.2 L'énergie à fournir à la batterie et son utilisation

Si nous supposons que l'onduleur est bien utilisé :

Son taux de charge doit être élevé (de 0.75 à 1).

Le rendement de conversion est alors de 0.7 à 0.9 et nous retenons la valeur moyenne de 0.8.

Ainsi, la puissance à fournir à l'onduleur pour disposer de l'énergie E à la sortie

(Sous 220 V CA) est de [16] :

$$P = E / 0.8 = 1.25 E$$

L'analyse des consommations donne l'énergie qui est demandée à l'onduleur (sans l'emploi d'une seconde source et avec l'emploi des équipements à grande puissance.

1.8 L'énergie électrique fournie par le générateur photovoltaïque

Elle dépend bien sûr de l'ensoleillement reçu et de l'orientation du panneau. L'estimation de l'énergie solaire reçue sur le site est simple, mais il faut tenir compte des caractéristiques propres au site de l'installation lui-même.

1.8.1. Estimation de l'énergie solaire reçue sur un site donné

Cette estimation doit tenir compte à la fois :

- Des données statistiques concernant l'énergie solaire reçue sur la région d'installation
- Des caractéristiques propres au site et susceptibles d'empêcher le panneau photovoltaïque de recevoir toute l'énergie possible (du fait des masques, neige, poussière...). [17]

1.8.2 Les valeurs statistiques de l'énergie solaire

Il est nécessaire de connaître avec une assez bonne précision l'énergie solaire reçue en moyenne par jour sur le site pendant une période donnée. Cette période est en générale égale à un mois. [17]

Selon les pays, les quantités sont connues à partir de l'une ou l'autre des données suivantes (pour une période donnée) :

- Nombre moyen d'heures d'ensoleillement par jour (ou durée d'insolation) ;
- L'irradiation moyenne reçue au sol (plan horizontal) ;
- L'ensoleillement global sur un plan incliné à un certain angle ;

La troisième forme est de loin la plus intéressante, car elle permet facilement, l'angle d'inclinaison des panneaux étant donné, de déterminer l'énergie électrique produite par un panneau de puissance crête donnée.

Caractéristiques propres au site

Ces caractéristiques peuvent être :

Les conditions atmosphériques exceptionnelles La neige, les poussières.

Les masques La cause de réduction la plus importante est constituée par les masques (arbre, maisons...) ombragent tout ou partie du panneau pendant une partie de la journée chaque jour, ou pendant une certaine période de l'année (en général l'hiver). [18]

1.8.3 Estimation de l'énergie fournie par un panneau photovoltaïque

Pour un angle d'inclinaison donné, du panneau photovoltaïque la série des quantités d'énergie solaire reçue permet d'estimer l'énergie électrique fournie par le panneau en moyenne, par jour, pour chaque mois. Un panneau de puissance crête totale P_c , qui reçoit du soleil (n KWh/m² /jour), peut fournir au mieux ($n P_c$ KWh/m² /jour). [19]

Malheureusement, ce panneau produit en fait une quantité d'énergie électrique nettement moindre, car : [20]

Le panneau ne fonctionne que rarement à son point de fonctionnement optimal (sauf si un dispositif électronique d'adaptation asservie est utilisé).

En particulier, un panneau débitant sur une batterie ne fonctionne pratiquement jamais à son point de puissance maximale (16 V pour une batterie de 12 V, mais variable avec l'éclairement).

- Les diodes et les connexions causent des pertes d'énergie.
- Les disparités entre les modules causent des pertes d'énergie.
- Le point de puissance maximal dépend aussi de la température du panneau.
- Il est difficile de traduire par une formule utilisable la résolution de ces pertes.

L'expérience montre que l'énergie produite pratiquement par un panneau de P_c watts crête recevant une énergie de n KWh par jour est de : $n \cdot P_c \cdot 0.7$ KWh/jour.

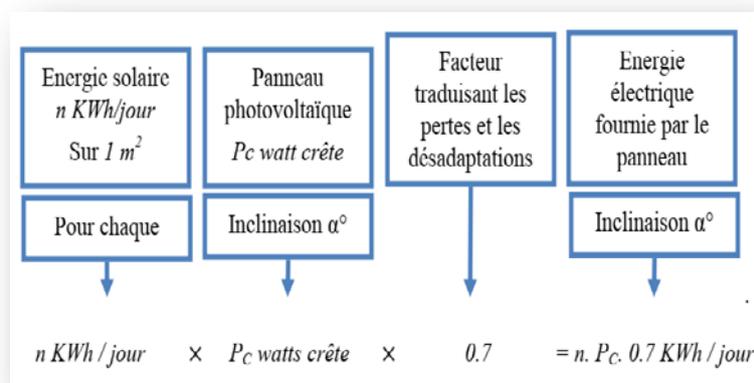


Figure 1.21 L'énergie électrique fournie par un panneau en tenant compte des pertes et les désadaptations [1]

1.9 Dimensionnement du panneau photovoltaïque

La détermination de puissance crête installée présente un intérêt tout particulier, compte tenu du coût du watt-crête. Généralement, la variation de l'énergie fournie par un panneau photovoltaïque d'inclinaison donnée, ne suit pas celle des besoins en énergie d'une habitation.

Si on fixe la puissance crête pour satisfaire au mieux les besoins d'un mois donné, on obtient

généralement un déficit ou un excédent pour d'autre mois. Sur quelle période faut-il s'efforcer d'égaliser les besoins et les apports? Une inclinaison égale à la latitude du lieu permet de capter une quantité d'énergie annuelle maximale, mais :

- Une partie de cette énergie risque d'être inutile, l'énergie est chère à stocker.
- Le panneau risque d'être trop cher.

Une inclinaison forte (plus proche du vertical : latitude du lieu + 20° par exemple) favorise la captation de l'énergie solaire en hiver (quand le soleil est bas).[21]

1.9.1. Choix de la tension du fonctionnement

Le choix de la tension nominale d'un système dépend de la disponibilité de matériels (modules et récepteurs), aussi, il dépend des niveaux de puissance et d'énergie nécessaire selon le type

Puissance crête (W _c)	< 500 W _c	500W _c - 2KW _c	>2KW _c
Tension du système (V)	12 VDC	24 VDC	48 VDC

Figure1.22 : Choix de la tension de système d'application

1.10 Dimensionnement de la batterie

L'emploi de la batterie (pour la majeure partie de l'énergie consommée finalement) introduit des pertes.

Celles-ci proviennent :

- Du rendement énergétique de la batterie.
- De l'auto décharge, qui dépend de la durée de stockage (pour une batterie donnée).

Pour une batterie dite solaire, c'est-à-dire bien adaptée aux systèmes photovoltaïques, le rendement énergétique est de 0.80 à 0.85 et l'auto décharge de 3% par mois environ. Le rendement global constaté dans un système est de 0.8 en général,

Donc:

$$E_b = E_p * 0.8$$

E_b : L'énergie de la batterie

E_p : L'énergie de panneau

1.10.1. Rôle du stock d'énergie

Faire face aux périodes trop peu ensoleillées:

le stock permet de satisfaire les besoins malgré la quantité aléatoire d'énergie solaire reçue ; en particulier, il assure la continuité du service pendant les périodes sans soleil (d'une certaine longueur). Utiliser au mieux le panneau de photopiles : si celui-ci n'a pas été dimensionné sur le mois le moins ensoleillé, la batterie doit permettre de combler un déficit éventuel pendant certaines périodes. [22]

1.10.2. Capacité de la batterie

La capacité de la batterie est donc :

$$C = CR + CU \quad (1.8)$$

La capacité résiduelle CR est la capacité qui n'est pas utilisée, pour préserver la batterie, tandis que la capacité utile CU, est la capacité qui peut être effectivement déchargée si nécessaire. [22]

Elle est égale à:

$$CU = C1 + C2 \quad (1.9)$$

1.11 Dimensionnement de l'onduleur

Suivant l'application, on devra souvent utiliser un convertisseur pour adapter la puissance générée à la charge.

Il existe principalement les convertisseurs DC/DC qui fournissent à la charge une tension DC différente de la tension générée par les panneaux et les convertisseurs DC/AC qui produisent une tension alternative pour les charges correspondantes.

Ce sont des onduleurs. Ils peuvent être utilisés pour alimenter une charge isolée mais aussi pour raccorder un générateur PV au réseau. La déformation de l'onde due aux commutations est susceptible de produire des perturbations plus ou moins gênantes pour les cellules PV. Les onduleurs peuvent être classés en générateurs produisant soit une onde sinusoïdale, soit une onde carrée ou une onde dite pseudo-sinusoïdale. Le choix de l'onduleur dépendra des appareils qu'il devra faire fonctionner. L'onduleur est très sensible aux surcharges. Il est alors préférable

d'acquérir un onduleur qui limite le courant de démarrage grâce à un démarreur à fréquence variable.

Quelques paramètres importants de l'onduleur méritent d'être définis:

Puissance nominale : C'est la puissance exprimée en VA que le convertisseur est capable de délivrer en fonctionnement permanent. Théoriquement, le choix de la puissance à délivrer doit être la somme des puissances des équipements installés ou à installer, mais en pratique, il est rare que tous les appareils fonctionnent en même temps et le choix de la puissance résultera de la valeur maximale du profil moyen de consommation.

Rendement : C'est un critère très important, car il influe sur le dimensionnement du champ PV et de la batterie. Celui-ci varie en fonction du taux de charge (rapport de la puissance de sortie et de la puissance nominale), ainsi que la variation de ce rendement varie d'un onduleur à un autre. Le rendement de l'onduleur est aussi donné entre l'énergie consommée par la charge et l'énergie fournie par la source continue.

Consommation à vide : Une consommation à vide va réduire l'énergie emmagasinée par la batterie (cas de nuit). Pour cette raison, il est important de limiter les pertes à un faible pourcentage de la tension nominale (1 à 5 %). Pureté de la tension sinusoïdale pure (220 V – 50 Hz). La plus ou moins grande pureté de la tension est obtenue grâce à :

Un système de régulation qui tend à maintenir la tension et la fréquence aux valeurs nominales, quelle que soit la tension d'entrée ;

Un filtrage en sortie de l'onduleur, qui tend à lisser la forme de la tension donc à réduire le taux d'harmonique.

Durée de vie : Une garantie de 5 ans sur les produits est devenue la norme chez les constructeurs, alors qu'elle n'était que de 2 ans, il y a quelques années. Il est possible d'étendre la garantie à 10 ans voir 20 ans suivant les constructeurs. Cette étendue de la durée de vie est le résultat de l'utilisation de composants de meilleure qualité, surdimensionnés ou plus résistants aux hausses de températures. [14]

1.12 Dimensionnement des câbles de raccordement

La plupart des installations photovoltaïques fonctionne sous une faible tension (12 à 48 Vcc) et courant relativement élevé. Or, les pertes en lignes sont proportionnelles au carré de l'intensité (RI^2 ou R est la résistance du câble considéré). [23]

Qu'il s'agisse du câble permettant de raccorder le panneau à la batterie, ou de celui permettant de raccorder la batterie aux appareils, il faut en calculer la section de façon à limiter les pertes en

lignes. Celles-ci doivent être faibles par rapport à la puissance réellement transmise par la ligne, si possible inférieures à 04 ou 05 % de cette puissance.

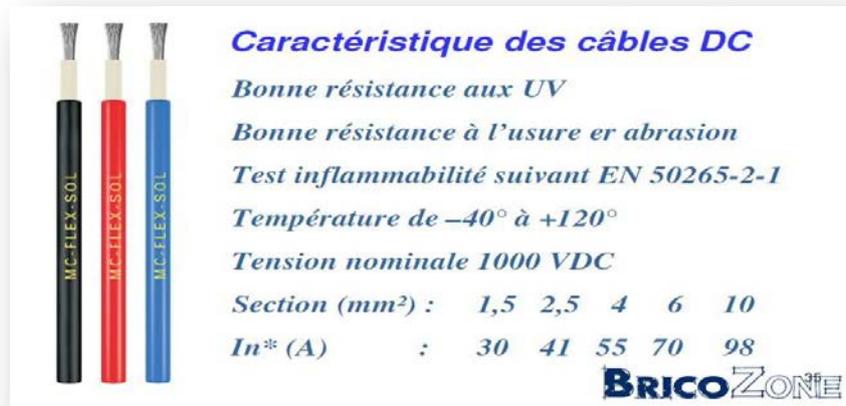


Figure1.23 : caractéristiques des câbles D

Conclusion

La ressource énergétique solaire est de très loin la plus abondante sur la terre (plusieurs milliers de fois l'ensemble de notre consommation énergétique) et les technologies photovoltaïques sont enfin arrivées à maturité avec des rendements tout à fait suffisants, des coûts suffisamment bas et une durée de vie élevée. En outre, la fabrication de la famille technologique dominante (au silicium) est fondée sur des matières premières très abondantes et recyclables. Enfin, c'est le seul moyen de production d'électricité à grande échelle capable d'effectuer une conversion totalement statique (pas besoin de transformations mécaniques) et donc silencieuse et très fiable. Par conséquent, l'électricité photovoltaïque constitue désormais la source la plus prometteuse pour le futur de l'humanité, d'autant que l'incroyable baisse des coûts à laquelle nous avons assisté durant ces dernières décennies n'est pas terminée. Si actuellement, elle ne représente encore qu'une petite fraction de la production mondiale d'électricité (4,2% en 2018), sa croissance (environ 50% de taux de croissance annuelle en moyenne sur les 10 dernières années) est telle qu'elle va dépasser toutes les autres sources. Nous allons donc enfin pouvoir exploiter pleinement le potentiel de notre meilleur réacteur de fusion nucléaire

Chapitre 2 : Fauteuils roulants électriques

2.1 INTRODUCTION :

Pour des personnes à mobilité réduite ou présentant une déficience motrice sévère (tétraplégie, infirmité motrice cérébrale, myopathie, ...), le fauteuil roulant électrique s'avère un moyen incontournable pour compenser le handicap de mobilité. De nombreux modèles sont proposés sur le marché. Ils se différencient par leurs caractéristiques mécaniques (assise, mécanisme de mobilité) et électriques (motorisation, commande, alimentation), ainsi que par leurs possibilités de contrôle (interface homme-machine, commandes annexes). Ces différents points font l'objet depuis plusieurs décennies d'investigations et d'innovations technologiques pour permettre d'adapter les fauteuils aux différents types de déficiences motrices dans le but d'offrir aux utilisateurs plus d'autonomie, de confort et de sécurité. Ainsi de nombreux paramètres comme par exemple la vitesse ou l'accélération maximale admissibles sont réglables pour tenir compte des possibilités physiques de l'utilisateur

Un nombre important de personnes handicapés ne peuvent pas utiliser un fauteuil électrique standard ou le conduisent difficilement. Pour permettre à ces personnes de se déplacer d'une manière autonome, des chercheurs se sont intéressés depuis plus de vingt ans à l'amélioration de l'interface homme-machine. Plus spécifiquement, soit en améliorant les actions de l'utilisateur sur le joystick classique du fauteuil, soit en implémentant de nouvelles interfaces de commande.

Un autre axe de recherche concerne le développement de fauteuils roulants électriques (FRE) « intelligents ». L'intelligence d'un fauteuil roulant réside dans sa capacité à percevoir l'environnement et temps de décharge d'une batterie.

De nombreux prototypes de fauteuils intelligents ont été développés dans les laboratoires de recherche. La plupart des technologies et méthodes de la robotique mobile ont été implémentées et testées sans que malheureusement cela n'aboutisse à de réels progrès pour l'utilisateur : seules des fonctionnalités de bas niveau (détection d'obstacles, suivi de lignes). [25]

2.2 Histoire du fauteuil roulant électrique :

Les fauteuils roulants électriques (FRE) offrent une mobilité fonctionnelle aux personnes ayant des déficiences des membres inférieurs et supérieurs. Plus de 200 000 personnes aux États-Unis utilisent les FRE comme principal moyen de mobilité

Le premier fauteuil roulant est apparu en Chine vers 1300 avant J.-C. sous forme de meubles montés sur des roulettes. Mais les vraies preuves de l'existence du fauteuil roulant sont issues de la Chine du 6ème siècle avant J.-C. et de la Grèce antique [25]. Les archives montraient des images avec des lits et des fauteuils à roulettes. À cette époque, on ne parlait pas vraiment de fauteuil roulant. Le premier prototype de fauteuil roulant a été fabriqué en 1554 à l'intention de Philippe II d'Espagne. L'horloger allemand Stephen Farffler crée au 17ème siècle un fauteuil roulant auto-propulsé grâce à une manivelle. Il le fabriquait pour ses propres besoins. Le fauteuil roulant répondait à de nombreux besoins liés au problème de la marche et de l'autonomie. Plus tard, il est produit à grande échelle pour répondre à des besoins universels, notamment au temps de la première guerre mondiale pour les blessés sur les champs de bataille. En 1933, deux nord-américains, Everst et Jennings, ont fabriqué un fauteuil roulant pliable. Ce n'est que pendant la Seconde Guerre mondiale que le Canadien Johann Klein inventa le fauteuil roulant électrique. Jusqu'à nos jours, cet appareil a subi de nombreuses améliorations pour être plus pratique et plus confortable.

Comme il a été dit plus haut, le premier fauteuil roulant électrique a été créé par l'inventeur canadien Johann Klein. Son invention a été destinée aux mutilés de la guerre. En effet, les conséquences dévastatrices de la Seconde Guerre mondiale ont fait ravage dans le monde entier. De nombreux combattants ne pouvaient plus marcher. Certains ont eu besoin de longues périodes de réadaptation. Le fauteuil roulant électrique a rendu service à l'humanité tout entière. Il a permis à donner l'indépendance et la mobilité à ces anciens combattants. Aujourd'hui, on peut motoriser un fauteuil roulant manuel en utilisant des solutions pratiques comme le Pomper. Mais si vous êtes de ceux qui veulent tout de suite opter pour un fauteuil roulant électrique, on trouve sur le marché des modèles très performants. Le fauteuil roulant motorisé comporte une batterie, dont l'autonomie dépend du modèle. La vitesse peut également varier en fonction des besoins de l'utilisateur. Enfin, de nombreuses options peuvent être intégrées comme un dossier et une assise rembourrés, un repose-pied et un appui-tête, des accoudoirs réglables, etc. Par ailleurs, il existe des fauteuils verticalisateurs pour permettre à l'utilisateur d'adopter une position debout. Certains modèles sont même dotés de roues pouvant monter les rails d'un escalier. Le revêtement et le rembourrage du fauteuil roulant varient pour convenir à chaque besoin. Le revêtement peut être en tissu plus doux ou en cuir facile à entretenir. Le rembourrage est généralement en mousse dont la densité peut varier. La commande peut être manuelle ou avec une pédale en fonction du handicap de l'utilisateur

2.3 Les origines du fauteuil roulant électrique

A partir des années 1950, les premiers fauteuils roulants électriques sont apparus à l'usage des personnes souffrant de déficiences motrices sévères [26]. Cependant, le fauteuil roulant manuel n'a pas été abandonné et son utilisation est restée très largement répandue comme en attestent les résultats des enquêtes « H.I.D. » réalisées en France, où la prévalence des utilisateurs de fauteuils roulants électriques et manuels dans la population générale était respectivement de 5,4 et de 5,9 personnes pour 10000 habitants [27].

2.4 Descriptif du fauteuil roulant électrique

Les fauteuils roulants à propulsion par moteur électrique sont indiqués pour les personnes ne pouvant se déplacer seules en fauteuil roulant manuel. Ils permettent de retrouver une indépendance notamment au niveau des sorties, à l'extérieur du domicile. [27] La conduite du fauteuil s'effectue par commande électronique mais parfois l'utilisation d'une commande spéciale est indispensable.

2.5 Les différents FRE

Il existe différents types de fauteuils qui sont présentés dans la (figure 2.1) [28].



Figure 2.1: Les différents types de fauteuils (A: Fauteuil d'intérieur, B: Fauteuil d'extérieur, C: Fauteuil verticalisateur, D: Fauteuil à hauteur variable).

2.5.1 Fauteuil d'intérieur : Pliant, il est moins volumineux qu'un fauteuil d'extérieur. Notons qu'il est cependant difficile et fatigant pour la tierce personne de le plier. Son autonomie va de 10 à 16 km et sa vitesse est réglable de 0 à 6 km/h. On peut le mettre dans le coffre d'une voiture.

2.5.2 Fauteuil d'extérieur : Non pliant, il est plus volumineux. Son autonomie va de 16 à 45 km et sa vitesse est réglable de 0 à 10 km/h. Ce fauteuil nécessite un moyen de transport adapté car on ne

peut pas le mettre dans un coffre de voiture. Le diamètre de ses roues permet de franchir des seuils ou des petits obstacles.

2.5.3 Fauteuil verticalisateur : La verticalisation permet de quitter la position assise pour se placer en position verticale. Elle permet également de mieux appréhender l'environnement et peut être important pour l'intégration sociale. Le fauteuil doit être équipé de cales genoux et d'une sangle au niveau du tronc.

2.5.4 Fauteuil à hauteur variable : Permet de lever l'utilisateur en position assise. Tout comme le verticalisateur il permet de mieux appréhender l'environnement et peut être important pour l'intégration sociale. Certains fauteuils électriques peuvent combiner verticalisation et hauteur variable en position assise. [28]

2.6 Les avantages d'un fauteuils roulants électriques :

- L'énergie électrique :

Cette raison peut sembler très évidente, mais elle est considérée comme l'une des meilleures caractéristiques d'un fauteuil roulant électrique. L'avantage moyen d'avoir un fauteuil roulant électrique par rapport à un fauteuil manuel est qu'il a un petit moteur électrique. [29]

Ce moteur électrique a la capacité de déplacer le fauteuil roulant électrique d'une manière beaucoup plus facile et simple. Ces fauteuils roulants électriques ne nécessitent aucune force du haut du corps. Cela permet également au fauteuil roulant de se déplacer dans n'importe quelle direction vers l'avant, d'un côté à l'autre et vers l'arrière. Ce fauteuil roulant électrique réduit les inconvénients de la poussée manuelle des roues.

- Déplacement sur terrain difficile :

Si vous vous rendez compte qu'il y aura un terrain accidenté à aborder, un fauteuil roulant électrique est certainement conçu pour l'exploration extérieure. L'achat d'un fauteuil roulant électrique pourrait être la meilleure option pour naviguer sur des terrains difficiles et en pente. Avec de grands gradins et une puissance suffisante dans le moteur électrique, il vous aide à surmonter toutes sortes d'obstacles. Vous vous rendrez compte que ce fauteuil roulant électrique est conçu de telle manière qu'il permet à l'utilisateur de s'aventurer sur les pistes les plus difficiles. De plus, le fauteuil roulant électrique est équipé d'une suspension qui aide à rendre la mobilité plus douce que sur un fauteuil roulant manuel. Un fauteuil roulant manuel devient d'autant plus difficile à utiliser qu'il se trouve dans une zone inclinée ou vallonnée. Dans un tel fauteuil roulant, il devient difficile de maintenir la force du haut du corps en grim pant et il y a un risque de reculer sur une pente. Un fauteuil roulant électrique est donc conçu pour surmonter ces problèmes et le moteur électrique qui est présent dans ce fauteuil roulant électrique aide à prendre le travail dur tandis que vous êtes sur une pente

- Réglage en hauteur :

Le fauteuil roulant électrique permet un réglage libre de la hauteur du fauteuil roulant. L'un des plus grands avantages d'un fauteuil roulant électrique est qu'il permet toujours à l'utilisateur de régler le dossier et la hauteur en fonction de son confort. Si on le compare au fauteuil roulant manuel, il limite certainement le mouvement de la hauteur à régler. Le fauteuil roulant électrique permet à l'utilisateur de changer de hauteur à n'importe quel niveau que vous voulez atteindre, que ce soit une étagère plus haute sur le marché ou si vous auriez besoin de vous asseoir à une hauteur plus basse sur la table à manger. Presque tous les fauteuils roulants électriques permettent au patient de changer la hauteur d'une simple pression sur un bouton. Ces fauteuils roulants électriques sont si bien conçus qu'il n'est pas nécessaire de faire appel à une tierce personne pour aider le patient lors du réglage en hauteur.

2.7 Les inconvénients d'un fauteuil roulant électrique :

- Très Cher :

Malgré les avantages de fauteuils roulants électriques, certains utilisateurs rencontrent des inconvénients avec les périphériques, tels que le coût élevé de l'obtention de l'appareil.

est une pièce coûteuse de l'équipement qui inclut plusieurs composants électriques et un élément motorisé. Souvent utilisé similaire à un petit véhicule [30].

- **Les batteries :**

Les composants électriques d'un fauteuil roulant électrique doivent être alimentés par une ou deux batteries. Cette batterie alimente les roues de la chaise et les autres fonctions électriques. Piles de fauteuil roulant s'appuient sur l'utilisateur à recharger la batterie régulièrement pour maintenir des performances optimales lorsque le fauteuil roulant électrique est en cours d'utilisation. Contrairement aux voitures, qui ont un alternateur intégré pour recharger la batterie que la voiture roule, les fauteuils roulants électriques ne tirent de la batterie. Si le président est fréquemment utilisé sur une base quotidienne, la batterie devra être rechargée tous les jours. Ce processus peut prendre jusqu'à quelques heures pour terminer [30].

- **Le Mode d'exercice :**

Être dans un fauteuil roulant réduit l'occasion de l'exercice régulièrement. Bien que les fauteuils roulants manuels traditionnels vous obligent à vous propulser vers l'avant ou vers l'arrière, les fauteuils roulants électriques effectuer tous les mouvements mécaniquement. Vous pouvez compléter la plupart des mouvements au sein de la chaise ou en utilisant le joystick. [30] Limitée exercice augmente le risque de complications de santé plus tard et réduit fonctions humaines de base

comme la capacité d'équilibrer le corps pendant le mouvement. Fauteuils roulants électriques peuvent vous aider à déplacer rapidement, mais ils encouragent le corps à rester sédentaire.

2.8 Batterie lithium pour les fauteuils roulant électriques :

Les fauteuils électriques fonctionnent généralement en 24 volts, c'est pourquoi on trouve deux batteries de 12 volts. Les deux batteries sont connectées en série pour que les tensions s'ajoutent [31]

Les batteries lithium SOLISE sont plus petites et plus légères. Le poids est divisé par 3 ou 4 par rapport à une batterie au plomb.

vos fauteuils seront plus faciles à transporter et les organes roulants s'abîmeront moins vite.

Elles ont une durée de vie importante 3 fois supérieures à une batterie plomb.

Elles sont garanties 2 ans.

Elles sont sans entretien.

Elles se rechargent plus vite.

Elles sont écologiques car elles ne comportent aucun métaux lourds.

Elles peuvent être stockées longtemps sans se décharger et sans s'endommager.

2.9 L'autonomie d'un fauteuil roulant électrique :

Dépend de deux types de facteurs, fixes et variables. [32]:

Les facteurs variables sont :

- La charge utile
- Les propriétés et la surface du sol
- L'environnement Votre façon de conduire
- La pression des pneus
- Les options électriques La capacité de la batterie

Les facteurs fixes sont :

- Le poids du produit
- La taille des batteries
- Le type de propulsion et de moteur
- La répartition du poids du produit
- Le type de propulsion et de moteur
- La répartition du poids du produit

Conclusion :

Le FRE est une technologie d'assistance essentielle à la mobilité pour les personnes souffrant d'une déficience motrice importante. Cependant il est nécessaire d'évaluer la conduite des utilisateurs afin de vérifier leurs aptitudes pour valider l'accès au FRE dans le cas d'une première prescription par exemple ou encore dans le cas d'une maladie évolutive. Il existe toutefois certaines limitations liées aux évaluations de la conduite en situation réelle, comme la sécurité du patient et de son entourage, ou encore la difficulté d'extraction de paramètres quantitatifs tels que le contrôle par joystick ou le suivi de trajectoire à partir de fauteuils roulants réels.

CHAPITRE 3

ÉTUDE D'UN

FAUTEUIL ROULANTS

ÉLECTRIQUES

3.1 Introduction :

Je vu dans la rue plusieurs des handicapés utilisent des fauteuils roulants électriques ils sont obligés de les recharger tous les soirs sous peine de tomber en panne le lendemain

Donc ces fauteuils étant très lourd à déplacer (même débrayés), nous avons pensé Installer des panneaux solaires à l'arrière et dessus du fauteuil afin de rallonger l'autonomie des fauteuils roulants électriques mais aussi les rendre autonomes Utiliser l'énergie solaire pour faire mouvoir un FRE est un objectif lointain. Se trouvant dans l'impossibilité de réaliser un véhicule, on s'est orienté vers une application à moindre risque.

Le module photovoltaïque délivre le courant électrique nécessaire pour recharger les batteries, mais aussi à protéger l'utilisateur du soleil et des intempéries. Le moteur électrique est alimenté par les batteries (2x12V /24 V) à travers un régulateur

Et pour faire ces études on a dimensionné bien le FRE et la modélisation permet de bien comprendre la simulation, ce dernier peut être considéré comme un langage de programmation adapté pour les problèmes scientifiques, grâce à ses fonctions spécialisées.

3.2 Qu'est-ce que Simulink?

Un outil de Simulation intégré à l'environnement de programmation scientifique MATLAB Ceci signifie, entre autres : [33]

- Edition de blocs
- Simulation de modèles non-linéaires
- Simulation de modèles discrets ou continus
- Simulation de modèles hybrides
- Simulation asynchrone (échantillonnage non uniforme)
- Interactions avec Matlab, ses extensions, ses boîtes à outil

3.3 Caractéristiques de régulateur :

Le régulateur de charge 12/24V contrôle le courant et la tension à la sortie des panneaux. La technologie MPPT offre au régulateur solaire une très haute performance :

- Permet de maintenir la charge de la batterie au maximum.
- Evite les sur-charges batterie
- Evite les décharges trop profondes
- Evite un retour de courant des batteries la nuit (diodes anti-retour)
- Protection contre les inversions de polarité pour le branchement des batteries
- Protection contre les inversions de polarité pour le branchement des panneaux
- Lorsque le courant de la charge (sortie 12V ou 24V) dépasse la capacité du régulateur, celui-ci passe en mode protection et affiche « OVERLOAD »

- Si un court-circuit apparaît le régulateur passe en mode protection et affiche « SHORT CIRCUIT »
- Quand on atteint le seuil bas des batteries, le régulateur coupe la charge (sortie 12V ou 24VDC) et l'autorise de nouveau quand le niveau de charge des batteries augmente.
- Quand le régulateur fonctionne normalement, l'écran LCD indique le courant de charge, le courant de sortie (décharge) et la tension de la batterie, avec un rafraîchissement des informations toutes les 5 secondes.
- Le régulateur indique le nombre d'ampères/heures chargés et le nombre d'ampères/heures consommés.

Le régulateur de charge affiche la température ambiante.

- Ce régulateur permet de gérer la compensation de température Il est livré avec une sonde qui doit être branchée à l'arrière du régulateur. Si la sonde n'est pas branchée la compensation de température ne fonctionne pas. [34]

3.4 Choix d'une batterie pour votre FRE :

Il est tout à fait déconseillé d'utiliser des batteries de démarrage sur les fauteuils électriques : les batteries de démarrage peuvent délivrer des courants importants très importants pendant quelques secondes, mais ne résistent pas à un nombre important de cycles charge / décharge avec une profondeur de décharge importante.

Deux types de batteries étanches équipent les fauteuils roulants :

- les batteries Gel : sont les plus couramment utilisées sur les fauteuils roulants électriques. Elles résistent bien à un nombre important de cycle charge / décharge. Seul inconvénient, leur prix.
- les batteries AGM : permettent d'obtenir des fortes puissances (elles peuvent être déchargées rapidement)

Les batteries AGM présentent deux inconvénients majeurs :

- leur relativement faible durée de vie en cyclage (compensée par leur moindre coût que les batteries Gel)
- les batteries supportent très mal d'être totalement déchargées : pas de décharge supérieure à 85 - 90 % sinon les batteries AGM risquent de perdre une grande partie de leur capacité. Les batteries AGM devront être rechargées avant d'être totalement "à plat ». [35]

3.5 Dimensionnements du système :

L'objectif est de charger les batteries afin d'assurer et/ou prolonger l'autonomie du fauteuil.

Les batteries sont de 2x12V de 82.3Ah chacune. Cela revient à un bloc de 24V pour une puissance de 82.3Ah.

Une solution à double panneaux solaires (pour réduire l'encombrement) montés en série.

Le montage en série permet d'additionner la tension des batteries, en revanche la capacité en Ah reste celle d'une seule batterie.

- L'énergie consommé journalier :

$$E_c = P_m * T_{\text{ensoleilment}}$$

$$E_c = 400 * 2h = 800Wh$$

- La puissance crête des panneaux :

$$P_c = E_c / (I_r * k)$$

$$P_c = 800 / (5 * 0.75) = 133.85W$$

- Nombre de panneaux :

$$N_p = P_c / P_{pv}$$

- La capacité totale :

$$C = (E_c * 2) / (V_{\text{sys}} * \text{dod} * B_c)$$

$$C = (800 * 2) / (24 * 0.9 * 0.9)$$

$$C = 82.3Ah$$

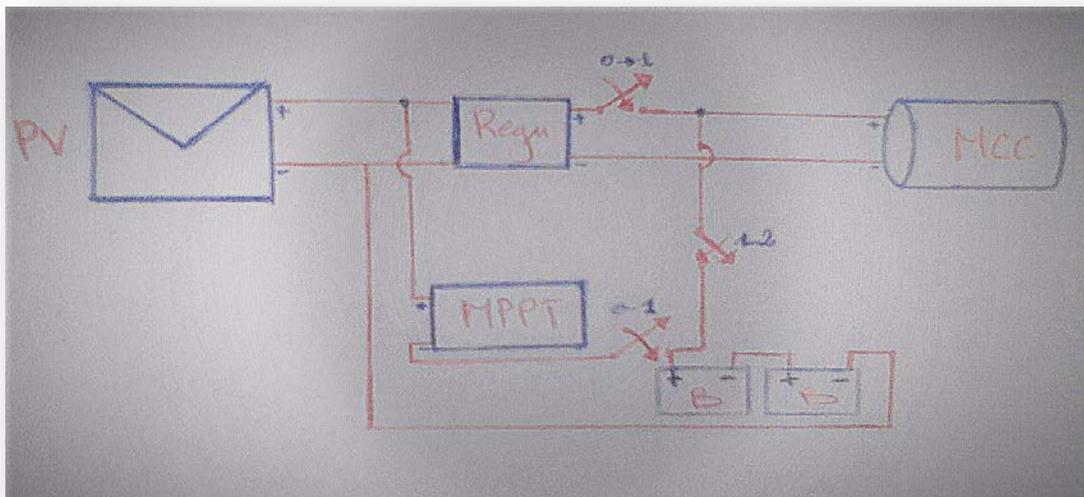


Figure 25 : schéma bloc général de système

3.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, on présentera une étude d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT numérique « perturbation et observation ». Ce système est composé d'un générateur photovoltaïque, un convertisseur survolteur DC/DC Boost, une commande MPPT « perturbation et observation ».

Conclusion générale :

Grâce au développement durable, la technologie photovoltaïque a montré son potentiel comme source d'énergie renouvelable. Ce projet de fin d'étude est basé sur l'étude d'un fauteuil roulant électrique adapter par panneau solaire pour charger les deux batteries en série

Cependant les générateurs photovoltaïques possèdent deux inconvénients majeurs qui sont un rendement faible et un coup élevé, cela se vérifie sur la caractéristique I-V sous l'influence de différentes températures. L'étude des générateurs photovoltaïques a permis la connaissance du comportement de ces derniers en fonction de l'éclairement et de la température et leurs effets sur les caractéristiques électriques, et par conséquent sur leur rendement.

la méthode MPPT « Perturbations et Observation » l'utilisation de cette commande permet d'améliorer le rendement de la batterie solaire.

Les batteries continuent d'être privilégiés pour les systèmes de stockage d'énergie solaire photovoltaïque. Toutefois, la variabilité inhérente aux processus de fabrication et de conception des composants influe sur le rendement de la batterie fabriquée.

Par conséquent, la batterie a acide de plomb développe rapidement qui ne sont pas très flexibles pour modéliser ce type de variabilité. Nous nous concentrons dans ce mémoire aussi la mise en place d'une batterie qui utilise le modèle CIEMAT, (Research Center for Energy, Environment and Technology, Espagne) ce modèle est développé en MATLAB/SIMULINK, le choix du Le modèle de Copetti, présente une bonne performance pour représenter le fonctionnement dynamique et complexe des batteries.

Bibliographies

- [1] Z. Bendjellouli. "Contribution à la modélisation d'une cellule solaire". Mémoire de Magister. Université de Bechar, 2009. et Mémoire de Magister. Université de Tlemcen, 1998.
- [2] E. Schiller. "Le pompage photovoltaïque, manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens". Université d'Ottawa, 1998.
- [1] Z. Bendjellouli. "Contribution à la modélisation d'une cellule solaire". Mémoire de Magister. Université de Bechar, 2009.
- [3] A. Zerga. "Optimisation du rendement d'une cellule solaire à base de silicium monocristallin de type n+p". Mémoire de Magister. Université de Tlemcen, 1998.
- [4] SER - Annuaire de la recherche et de l'industrie photovoltaïques françaises 2013-2014
- [5] document Environnement. Brussels LE PHOTOVOLTAÏQUE FONCTIONNEMENT ET TECHNOLOGIES
- [6] Stéphane Vighetti, Yves Lembeye, Jean-Paul Ferrieux, Jean Barbaroux. Module photovoltaïque et ombrages : étude et intégration d'une structure d'équilibrage. EPF 2010, Jul2010, Saint-Nazaire, France.
- [7] Violaine Didier. Les Onduleurs pour Systèmes Photovoltaïques Fonctionnement, Etat de l'Art et Etude des Performances - Août 2007
- [8] M. Staroswiecki and G. Comtet-Varga, "Analytical redundancy relations for fault detection and isolation in algebraic dynamic systems," *Automatica*, vol. 37, no. 5, pp. 687–699, 2001. [9] M. Rodrigues, D. Theilliol, M. Adam-Medina, and D. Sauter, "A fault detection and isolation scheme for industrial systems based on multiple operating models," *Control Eng. Pract.*, vol. 16, no. 2, pp. 225–239, 2008.
- [10] Christian laize (IES-CNRS-Université Montpellier2) Sylvie Geniès (CEA-INES)
- [11] YaëlThiaux. Optimisation des profils de consommation pour minimiser les coûts économique et énergétique sur cycle de vie des systèmes photovoltaïques autonomes et hybrides - Evaluation de la technologie Li-ion. Sciences de l'ingénieur [physiques]. École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, 2010.
- [12] Alain Ricaud, "Systèmes photovoltaïques" Polytech' Savoie Oct 2011.
- [13]<https://panosol.fr/panne-donduleur-photovoltaique-faire/>
- [14] Les Onduleurs pour Systèmes Photovoltaïques Fonctionnement, Etat de l'Art et Etude des Performances - Août 2007 –
- [15] Abou El-Maaty Metwally Metwally Aly Abd El-Aal. Modelling and simulation of a photovoltaic fuel cell hybrid system, these de doctorat de l'Université de Kassel, Germany, 2005.

- [16] : FOGELMAN & Régis MONTLOIN, « Installations Photovoltaïques dans l’habitat isolé » livre édité par : EDISUD, 1983.
- [17] Etude statistique du rayonnement solaire
- [18] : I. BENSEFIA & S. MAMOUN, « Dimensionnement d’une installation photovoltaïque d’une Maison Autonome Appliquée au Site de Tlemcen », Mémoire de fin d’étude présenté pour l’obtention du Diplôme Licence LMD en Physique Energétique, Université de Tlemcen, Juillet
- [19] : FOGELMAN & Régis MONTLOIN, « Installations Photovoltaïques dans l’habitat isolé
- [20] : Falk ANTONY, Christian DÜSHNER et Karlheinz REMMERS, « Le photovoltaïque pour tous Conception et réalisation d’installation », livre édité par : INES), 2006.
- [21] Labouret (A.), Cumunel (P.), Braun (J.-P.), Faraggi (B.), Cellules solaires – Les bases de l’énergie photovoltaïque, Dunod, coll. ETSF, 2010
- [22] Ecolodis Solaire, batterie-solaire-capacité-et-durée-de-vie
- [24] : FOGELMAN & Régis MONTLOIN, « Installations Photovoltaïques dans l’habitat isolé » livre édité par : EDISUD, 1983.
- [23] : I. BENSEFIA & S. MAMOUN, « Dimensionnement d’une installation photovoltaïque d’une Maison Autonome Appliquée au Site de Tlemcen », Mémoire de fin d’étude présenté pour l’obtention du Diplôme Licence LMD en Physique Energétique, Université de Tlemcen, Juillet 2008
- [24] :ML Jones and JA Sanford. People with mobility impairments in the united states today and in 2010. Assistive Technologies, 8(1) :43–53, 1996
- [25]:Watson N., Woods B. (2008) A social and technological history of the wheelchair. In : Le Fauteuil Roulant, Actes des 21ème Entretien de la Fondation Garches., pp. 9-20. Watson N., Woods B. (2008) A social and technological history of the wheelchair. In : Le Fauteuil Roulant, Actes des 21ème Entretien de la Fondation Garches., pp. 9-20
- [26]:Watson N., Woods B. (2008) A social and technological history of the wheelchair. In : Le Fauteuil Roulant, Actes des 21ème Entretien de la Fondation Garches., pp. 9-20. Watson N., Woods B. (2008) A social and technological history of the wheelchair. In : Le Fauteuil Roulant, Actes des 21ème Entretien de la Fondation Garches., pp. 9-20.
- [27]:Vignier N., Ravaud J.F. (2008) Les utilisateurs de fauteuil roulant en France : aspects sociaux épidémiologiques. In : Le Fauteuil roulant. Actes des 21èmes entretiens de la Fondation Garches. Pp. 21-33.
- [28]: thés. Planification automatique de trajectoire d’un fauteuil roulant intelligent
- [29]:mdm-france./fauteuil-roulant-électrique.
- [30]: passionatepeople.invacare.fr/avantages-fauteuil-roulant-electrique-pliant.
- [31] : masolise.com/batterie-lithium-fauteuil-roulant

[32] :Matériel médical, de bien-être et de confort

[33]: Mr. DEMICHE Amazigh & Mr. DJEBBAB Juba Planification automatique de trajectoire d'un fauteuil roulant intelligent et Université Laval Québec, CANADA Introduction à MATLAB et Simulink

[34]: APB-ENERGY - 1484, route d'Annecy 74370 CHARVONNEX - FRANCE /régulateur-standard.

[35] batterie-solaire /Batterie-fauteuil-roulant-electrique.