

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE

Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du Diplôme de Master en
Installation énergétique et turbomachines

Titre
**Dimensionnement d'un système photovoltaïque pour un
moteur brushless A2212/13T**

Proposé et encadré par :
H.Bentrad
H.abdi

Réalisé par :
Maroc Islam Yasser
Derf Aniss

Année universitaire 2019/2020

ملخص :

في الوقت الحاضر ، تحتل ما يسمى بالتقنيات الخضراء مكاناً أكثر فأكثر في العالم ، ويفضل هذه التقنيات على وجه الخصوص ، فإن جزءاً من الكهرباء التي نستهلكها نظيف ، وكما نرى فإن الطاقة الشمسية الكهروضوئية هي الشركة الرائدة في هذا المجال .

تغذية محرك بواسطة تحويل ضوء الشمس إلى كهرباء بواسطة ما يسمى بالنظام الكهروضوئي .

الهدف من هذا العمل هو حساب المنظومة الكهروضوئية لمحرك brushless A2212/13T و زيادة عمر البطارية.

الدراسة تمت في ثلاث مناطق هي الجزائر و تمنراست و غرداية بأخذ استهلاك محرك brushless A2212/13T و الذي يقدر ب 334 hW

Résume :

De nos jours, les technologies dites vertes occupent de plus en plus de place dans le monde, et grâce à ces technologies notamment, une partie de l'électricité que nous consommons est propre, et comme on peut le voir, le solaire photovoltaïque est le leader dans ce domaine.

L'alimentation du moteur en convertissant la lumière du soleil en électricité par ce qu'on appelle un système photovoltaïque.

Le but de ce travail est d'étudier système photovoltaïque pour moteur brushless A2212/13T et augmente l'autonomie de batterie

L'étude a été menée dans la région de Alger et Tamanrasset et Ghardaïa en prenant une consommation journalière de 334 Wh pour moteur brushless A2212/13T

Abstract

:

At present, so-called green technologies are taking place more and more in the world, and thanks in particular to these technologies, part of the electricity we consume is clean, and, as we see it, photovoltaic solar power is the industry's leader.

A motor feed by converting sunlight into electricity by the so-called photoelectric system.

The purpose of this work is to calculate the photovoltaic system for Brushless A2212/13T and to increase battery life.

The study was conducted in the region of Algiers and Tamanrasset and Ghardaïa taking a daily consumption of 334 Wh for brushless engine A2212/13T

REMERCIEMENTS

En premier lieu, je tiens à remercier le bon DIEU, de

M'avoir donné

Le courage et la patience pour mener à bien ce

Travail pendant toute cette longue année, je remercie également mes parents et toute ma famille

pour tout ce qu'ils ont fait pour moi, mes vifs

remerciements s'adressent à mon promoteur

Bentrad hocine et mon co promoteur Abdi hamid

pour son aide, ses conseils, sa

Disponibilité durant toute la période de ce projet de

fin

D'études.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes parents, qui étaient toujours là pour moi

dès mon enfance, garce à eux que J'ai pu

atteindre ce succès

Que Dieu les protège

A Mon cher frère :

A ma chère sœur :

A toute ma famille

A tous mes amis et collègues sans exception

Remerciement

Dédicaces

Table des matières

Nomenclature

Liste des figures

Liste de tableaux

Introduction générale

Table des matières

1	Energie solaire	3
1.1	Caractéristiques du rayonnement solaire :	3
1.2	Composition :.....	3
1.3	Le rayonnement solaire au sol :	4
1.3.1	Le rayonnement solaire direct :	4
1.3.2	Le rayonnement solaire diffus :	4
1.3.3	Rayonnement solaire réfléchi (l'albédo) :	4
1.3.4	Le rayonnement global :	4
1.4	Irradiance sur une surface horizontale :	5
2	AVION PROPULSÉ PAR L'ÉNERGIE SOLAIRE	5
2.1	Installation de cellules solaires sur avion :	6
1	L'ÉNERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE :	8
1.1	Généralités :	8
1.	La cellule photovoltaïque	8
1.2	Principe de fonctionnement :	10
2	Classification de cellules solaires :	11
2.1.1	Matériau cristallin.....	11
2.1.2	Les filières dites « Couches Minces »	12
2.1.3	La cellule de silicium amorphe (a-Si)	12
2.2	Efficacité et taille des cellules solaires	14
3	Le générateur photovoltaïque :	15
3.1	La courbe courant-tension :	15
3.1.1	Courant de court-circuit (I _{cc}) :	16

3.1.2	Tension de circuit-ouvert (V_{co}) :	16
3.1.3	Puissance maximale d'une cellule PV :	16
4	Influence de l'éclairement et de la température :	16
4.1	Influence de l'éclairement solaire :	16
4.2	Influence de la température :	17
5	Couplage des cellules photovoltaïques.....	18
5.1	Module photovoltaïque.....	18
5.2	Association série :	19
5.3	Association en parallèle :	19
5.4	Association en série/parallèle :	20
1	Historique :	21
2	Principe de fonctionnement :	21
3	Type de technologie de stockage d'énergie :	22
3.1	Batteries Ni-Cd.....	23
3.2	Batteries lithium-ion :	23
3.3	La batterie lithium-ion (Li-ion).....	23
3.4	La batterie lithium-polymère (Li-po)	24
3.5	Batteries au plomb	24
3.6	Batteries Ni-MH.....	24
4	Les principaux paramètres d'une batterie	25
4.1	La puissance utilisable ($P = V.I$) en kW :	25
4.2	La capacité :	25
4.3	État de charge de la batterie (SOC).	26
4.4	Autodécharge :	26
4.5	Le taux-C :	27
5	Comparaison entre les différentes technologies de batteries :	27
6	Régulateur de charge solaire :	28
6.1	Régulateur PWM (PULSE WITH MODULATION):.....	28
6.2	Régulateur MPPT (MAXIMUM POWER POINT TRACKER):	28
7	La différence entre un régulateur PWM et MPPT.....	29
1	Système d'énergie solaire	31
2	Spécification des cellules solaires	33
3	Spécification du moteur sans balais (BLDC)	34
4	Spécification du régulateur électronique de vitesse (ESC) :	35
5	Spécification de la batterie	35

5.1	Estimation du poids de l'avion :	36
5.2	Calculer la durée de vol	37
5.3	Rapport Poids/Poussée	37
5.4	Consommation en vol.....	37
5.5	Durée de vol	37
6	Spécification Régulateur de charge	38
7	Estimation des coûts :	40
1	Procédure de calcul :	41
1.1	Estimation du besoin d'électricité (E_{cj}) :	41
1.2	Puissance des cellules requise (P_g) :	41
1.3	Puissance unitaire du module (P_u) :	41
2	Estimation du nombre des cellules photovoltaïques :	42
2.1	Association des cellules :	42
2.1.1	Association en série :	42
2.1.2	Association parallèle :	43
3	Dimensionnement du système photovoltaïque :	43
3.1	Energie solaire incidente (E_s):	43
3.2	Présentation du logiciel METEONORM :	43
3.3	Caractéristique du site d'Alger, Ghardaïa et Tamanrasset :	45
4	la durée d'insolation mensuelle :	46
5	Irradiation mensuelle incidente sur un plan horizontal :	47
6	Calcul de l'énergie consommée par jour (E_{cj}) :	48
6.1	Calcule puissance des cellules requise (P_g) :	48
6.2	Rayonnement globale journalier :	49
6.3	Puissance solaire reçue (P_r) :	49
6.4	Puissance unitaire de la cellule (P_u) :	50
7	Estimation du nombre de cellules :	50
7.1	Le nombre de cellules connectés en série :	50
7.2	Le nombre de cellules connectés en parallèles :	51
8	Calcule pour le mois plus défavorable :	52
8.1	Calcule puissance des cellules requise (P_g) :	52
8.2	Puissance solaire reçue (P_r) :	53
8.3	Puissance unitaire de la cellule (P_u) :	54
9	Estimation du nombre de cellules :	54
9.1	Le nombre de modules connectés en série :	54

9.2	Le nombre de cellules connectés en parallèles :.....	54
10	Conclusion générale :	56

Table des figures

Figure (I.1) Types de rayonnement : direct, diffus et réfléchi.....	4
Figure (I.2) Irradiance directe et diffuse sur une surface horizontale.....	5
Figure (I.3) Solar Impulse (image de synthèse) Solar Impulse	6
Figure (I.4) Sky-Sailor en vol.....	6
Figure (I.5) Deux modèles de l'irradiance en fonction de l'heure. Le modèle de Duffie et Beckman correspond à la référence.....	7
Figure (I.6) Evolution de I_{max} et de la durée du jour T_{day} pour la ville d'alger	7
Figure (I.7) structure basique d'une cellule solaire.	9
Figure(I. 8) Structure d'une cellule photovoltaïque utilisant le silicium comme matériau PV (présence d'une jonction PN).....	10
Figure (I. 9) Classification de la cellule photovoltaïque fondée sur du matériau photovoltaïque	11
Figure(I. 10) Cellule amorphe	
Figure (I. 11) cellule monocristalline	
Figure(I. 12) cellule polycristalline	13
Figure (I. 13) L'évolution des différentes filières photovoltaïques.....	14
Figure (I.14) rendement maximum par mètre carré de cellules photovoltaïques	14
Figure (I.15) La courbe représente la caractéristique d'un panneau photovoltaïque.....	15
Figure (I. 1) Caractéristique courant-tension d'une cellule PV à température constante en fonction de l'éclairement.....	28
Figure (I. 2) Influence de l'irradiation- Puissance en fonction de la tension.....	28
Figure (I.18) La tension V_{co} en fonction de la température.....	29
Figure(I.19) Intensité ICC en fonction de la température.....	18
Figure (I.20)Caractéristique courant-tension d'une cellule PV a éclairement constant en fonction de la température.....	29
Figure (I.21) Influence de la température - Rendement en fonction de l'irradiation.....	18
Figure (I.22) la caractéristique résultante obtenue en association en série.....	19
Figure (I.23) la caractéristique résultante obtenue en association en parallèles	20
Figure (I.24) la caractéristique résultante obtenue en association en parallèles/série.	20
Figure(II.1) Principe de fonctionnement des accumulateurs.....	21
Figure(II. 2) Diagramme de Ragone des systèmes électrochimiques rechargeables.....	23
Figure(II. 3) La capacité de stockage des différents types d'accumulateurs	26
Figure(II. 4) Comparaison entre les différentes technologies de batteries	27

Figure(II. 5) Graphique du point maximum de puissance.....	29
Figure(III. 1) système d'alimentation par énergie solaire	31
Figure(III. 2) système d'énergie solaire	31
Figure(III. 3) représente les éléments de système	32
Figure(III. 5) Spécifications de la cellule Sunpower C60	33
Figure(III. 6) A2212/13T 1000 KV	34
Figure(III. 7) Le contrôleur de vitesse L'ESC 30A.....	35
Figure(IV.1) interface du logiciel METEONORM	44
Figure(IV.2) image satellite montre la situation géographique du site d'Alger Ghardaïa Tamanrasset	45
Figure(IV. 3) La durée d'insolation du site d'Alger	
Figure(IV. 4) La durée d'insolation du site de Ghardaïa.....	46
Figure(IV.5) La durée d'insolation du site de Tamanrasset	46
Figure(IV. 6) Irradiation mensuelle du site d'Alger	
Figure(IV. 7) Irradiation mensuelle du site de Ghardaïa.....	47
Figure(IV. 8) Irradiation mensuelle du site de Tamanrasset	47
Figure(IV. 9) Rayonnement globale journalier d'Alger	
Figure(IV. 10) Rayonnement globale journalier de Ghardaïa	49
Figure(IV. 11) Rayonnement globale journalier de Tamanrasset	49

Liste des tableaux

Tableau (I, 1) : Comparaison des types de cellules solaires	13
Tableau (II, 1) : comparatif des caractéristiques principales pour les différentes technologies	25
Tableau (II, 2) : L'autodécharge des différents systèmes de batteries	27
Tableau (II, 3) : comparative entre régulateur de charge PWM et MPPT.....	30
Tableau (III, 1) : Les caractéristiques du moteur brushless A2212/13T	34
Tableau (III, 2) : Estimation du poids de l'avion	36
Tableau (III, 3) : comparatif pour plusieurs batteries 3S.....	38
Tableau (III, 4) : Estimation des coûts	40
Tableau (IV, 1) : Caractéristique du site d'Alger, Ghardaïa et Tamanrasset.....	45
Tableau (IV, 2) : irradiation mensuelle incidente sur une surface horizontale pour les différents sites étudiés en kWh/m ²	47
Tableau (IV, 3) : Caractéristiques la cellule solaire utilisé.....	48
Tableau (IV, 4) : tension du champ en fonction de sa puissance crête.....	51
Tableau (IV, 5) : performances de l'installation.....	52
Tableau (IV, 6) : performances de l'installation pour le mois le plus defavorable	55

Nomenclature

U : tension de la batterie (V)

P_r : Puissance solaire reçue

P_{mpp} : la puissance maximale

R_s : La résistance série

R_{sh} : la résistance parallèle

I_{cc} : courant de court-circuit

V_{co} : tension de circuit ouvert

P_{elec} : Puissance nominale du moteur

H_d : Durée d'insolation

K : Coefficient correcteur

E_s : irradiation journalière

S : Surface du module (m^2).

N_{cs} : nombre de cellules en série

MPPT : Maximum Power Point Tracking

η : Rendement du module

V_{ch} : tension du champ

P_c : puissance crête

D_j : durée du jour

P_u : puissance unitaire

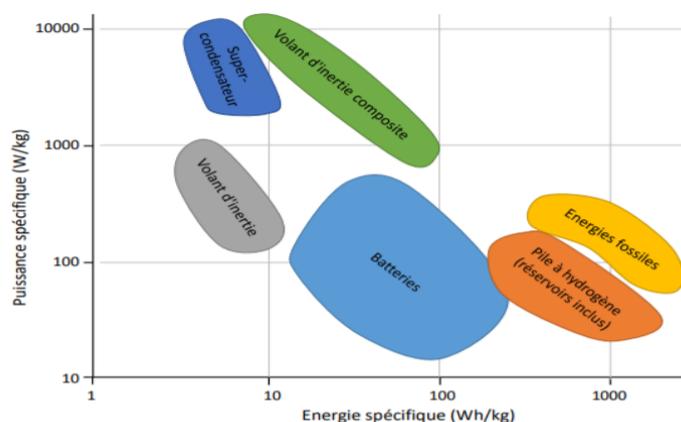
N_{cp} : nombre de cellules en parallèle

N_{hj} : durée de fonctionnement

Introduction générale :

L'endurance d'un aéronef est en soi une notion assez simple : il s'agit de la durée qui s'écoule entre le moment où les roues (quand il y en a) quittent le sol et celui où le contact avec la terre ferme s'établit à nouveau. Cette endurance est directement liée à la quantité et au type d'énergie disponible pour la motorisation. Les énergies fossiles comme le kérosène sont quasiment les seules utilisées en aéronautique en raison de leurs grandes densités énergétiques. L'inconvénient majeur de cette solution est qu'elle ne permet pas de régénérer même partiellement la quantité d'énergie embarquée au départ sauf à avoir recours au ravitaillement en vol. Cette technique, fondamentale en aéronautique militaire, revêt toutefois aux moins deux limitations importantes pour ce qui est de l'optimisation de l'endurance. D'une part elle ne permet pas d'augmenter l'endurance intrinsèque d'un aéronef et reporte ainsi le « problème » sur l'avion ravitailleur.

L'électricité ou l'hydrogène peuvent être des alternatives au kérosène. Dans le cas d'un aéronef, l'électricité est stockée dans des batteries et utilisée directement par un ou plusieurs moteurs électriques faisant tourner une ou plusieurs hélices. L'hydrogène est quant à lui utilisé soit comme carburant dans un moteur à hydrogène, soit comme source d'énergie pour une pile à combustible générant de l'électricité en remplacement de la batterie dans la solution électrique. Cet hydrogène est stocké dans des réservoirs sous très haute pression pour minimiser son volume. Malheureusement ces différentes solutions alternatives, pour intéressante qu'elles soient d'un point de vue écologique, ne répondront pas au problème d'endurance car elles présentent une densité énergétique moindre que celle du kérosène



Figure(1) Comparaison des sources d'énergie disponibles pour les drones (diagramme de Ragone) : puissance spécifique versus masse spécifique en échelle logarithmique

L'énergie solaire semble être l'unique solution pour résoudre la limitation de l'endurance. Cette énergie est illimitée le jour pour un aéronef volant au-dessus de la couverture nuageuse, c'est-à-dire, au-dessus de la troposphère. Le principe de fonctionnement est alors assez simple. Le jour, des cellules photovoltaïques positionnées à la surface de l'aéronef récupèrent l'énergie nécessaire au vol et aux instruments à laquelle il faut ajouter celle nécessaire au vol de nuit. Cette dernière est stockée soit dans des batteries soit sous forme d'hydrogène en utilisant une pile à combustible réversible (dite aussi régénérative). L'énergie stockée est alors restituée à la propulsion et aux instruments. Un tel concept, lorsqu'il est mis en œuvre dans un système de drone afin d'éviter des limitations en temps de vol d'équipage,

L'objectif de cette mémoire est d'analyser les difficultés d'alimenter les drones par énergie solaire. Pour cela, nous allons tout d'abord présenter dans le chapitre un les applications et les enjeux capacitaires puis l'historique des projets, des records de l'aéronautique solaire. Ensuite on donne une description générale des systèmes photovoltaïques et le mécanisme des conversions et la production du courant électrique à partir des photons incidents sur des plaques semi-conductrices,

Le deuxième chapitre traite le principe fondamental du fonctionnement d'un accumulateur et les différents types de stockage d'énergie solaire puis nous abordons quelques généralités sur les régulateurs de charge

Dans Le troisième chapitre nous présentons le fonctionnement du système d'alimentation solaire et le dimensionnement de tous les éléments du système, cette étude n'est pas basée sur un cahier des charges précis pour chacun des éléments à dimensionner, seules les caractéristiques du moteur brushless sont connues

Le dernier chapitre nous expliquons la démarche adoptée pour le dimensionnement des cellules photovoltaïques pour notre drone solaire dans trois sites différents. De ce fait, il convient de définir la consommation énergétique du moteur, et de déterminer la quantité de cellules photovoltaïques nécessaires pour satisfaire ce besoin.

1 Energie solaire

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante. La quantité d'énergie libérée par le soleil est captée par la planète terre pendant une heure et pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an. Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 Watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre pour une distance moyenne terre-soleil de 150 Millions de km, c'est ce que l'on appelle la constante solaire qui est égale à 1367W/m^2 . La partie d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser.

1.1 **Caractéristiques du rayonnement solaire :**

1.2 **Composition :**

Le rayonnement solaire se compose de radiations électromagnétiques émises par le soleil, dont le spectre s'étend des plus petites longueurs d'ondes (rayons gamma) vers les grandes ondes radioélectriques. Les parties de ce spectre qui jouent un rôle dans l'interaction du rayonnement solaire avec l'environnement terrestre sont essentiellement les bandes infrarouges, visibles et ultraviolettes, ainsi que la gamme radioélectrique et celles des microondes lorsque ce rayonnement traverse l'atmosphère pour atteindre la surface terrestre, il est fortement atténué en raison des phénomènes d'absorption et de diffusion par les différents constituants de celle-ci.

1.3 Le rayonnement solaire au sol :

Afin de quantifier l'énergie développée par le générateur photovoltaïque dans une application donnée, il est nécessaire de connaître le spectre du rayonnement solaire reçu sur sol, on distingue quatre types de rayonnement :

1.3.1 Le rayonnement solaire direct :

Le rayonnement solaire direct dépend de la hauteur du soleil et de l'état du ciel,

1.3.2 Le rayonnement solaire diffus :

Il est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire global par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages et les aérosols.

1.3.3 Rayonnement solaire réfléchi (l'albédo) :

C'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige, etc....).il est calculé à partir de l'expression suivante :

1.3.4 Le rayonnement global :

La somme du rayonnement solaire direct et du rayonnement diffus constitue le rayonnement solaire global

Dans la figure ci-dessous figure () est schématisé l'ensemble des rayonnements solaires çu sur une surface terrestre.

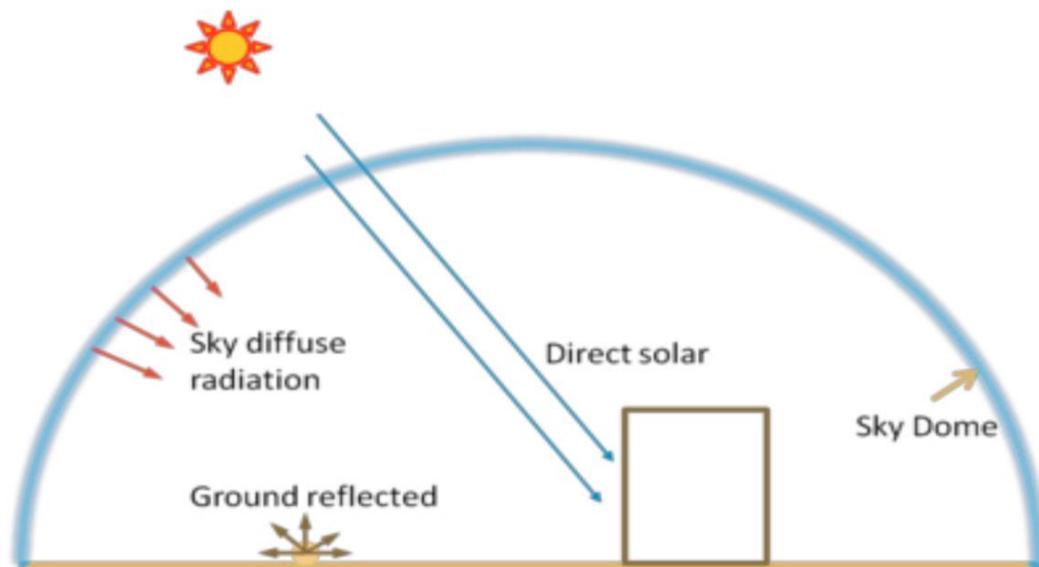


Figure (I.3) Types de rayonnement : direct, diffus et réfléchi

1.4 Irradiance sur une surface horizontale :

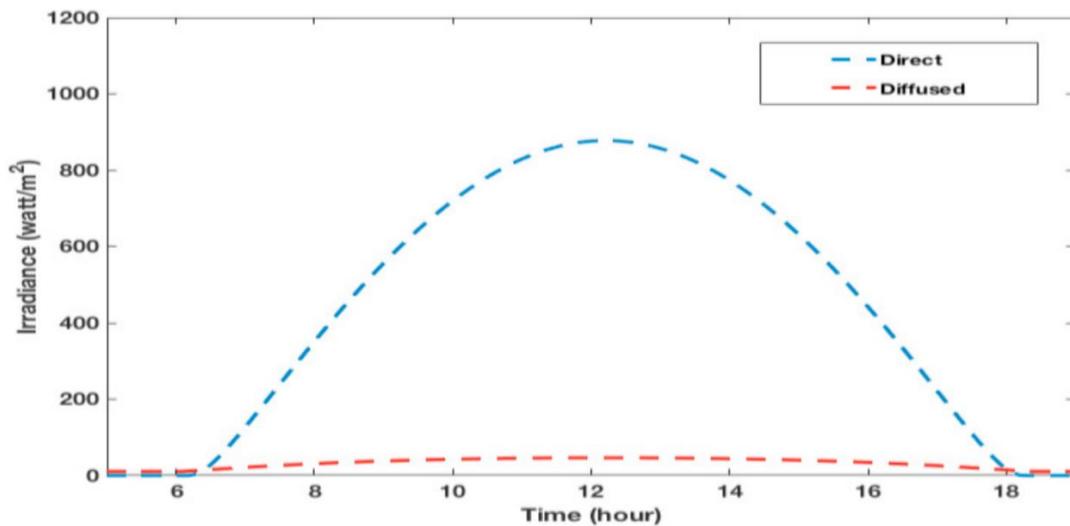


Figure (I.4) Irradiance directe et diffuse sur une surface horizontale

Rayonnement réfléchi au sol a une contribution sur 2% mais pour les drones en altitude, c'est négligeable. Le rayonnement direct représente environ 85 % de l'insolation totale frappant le sol et le rayonnement diffus est d'environ 15 %. Les conditions atmosphériques comme les nuages et la pollution augmenter le pourcentage de rayonnement diffus

2 AVION PROPULSÉ PAR L'ÉNERGIE SOLAIRE

Le tout premier avion alimenté par l'énergie solaire a été le Sunrise I, construit en 1974. Il était alimenté par l'énergie solaire monocristalline et installé avec des cellules 4096PV qui ont produit 450 W de puissance et un rendement de 11%. En 1980, le tout premier avion à équipage humain powered by monocristalline a été construit par le Dr Paul MacCready. Il a également créé le Solar Challenger installé avec 16 000 cellules solaires montées sur ses ailes, qui ont généré 2500 W, sans dispositifs de stockage d'énergie. En 2005, Alan Cocconi a produit SoLong avec la cellule solaire monocristalline SunPower A300, qui a fourni une puissance de 225 W et dispositif de stockage de la batterie Lithium-ion de 1200 Wh. Le Solar Impulse I, en 2009, est installé avec des cellules solaires monocristallines de 11 628 avec un rendement de 18% et 84 W. La batterie au lithium polymère avec un Une densité énergétique de 240 Wh/kg a été utilisée. Et récemment, le Solar Impulse II a fait le tour du monde à partir de 2014 à 2016. L'avion a été équipé de 17 248 cellules solaires monocristallines et a produit une puissance de 66 KW et une batterie de Lithium-ion.

2.1 Installation de cellules solaires sur avion :

L'utilisation de l'énergie solaire pour propulser un avion est actuellement un sujet d'actualité avec le projet Solar Impulse, qui a comme objectif de faire effectuer un tour du monde sans escale à un avion solaire piloté. Solar Impulse a effectué son premier vol le 7 avril 2010.



Figure (I.5) Solar Impulse (image de synthèse) Solar Impulse

André Noth a lui conçu, fabriqué et fait voler un avion sans pilote, le Sky-Sailor (3,3 m d'envergure), destiné à des vols de plus de 24 heures, et ne tirant son énergie que de l'énergie solaire. Une partie du surplus d'énergie capturée de jour est stockée pour le vol de nuit, à la fois sous forme électrochimique, par l'intermédiaire de batteries, et sous forme d'énergie mécanique potentielle, en faisant prendre de jour de l'altitude à l'avion.



Figure (I.6) Sky-Sailor en vol

L'irradiation dépend de plus – dans notre cas - de la situation géographique de l'avion, de l'heure, de la date, des conditions météorologiques, de l'assiette de l'avion et de la localisation du panneau de cellules sur l'avion. A titre d'illustration, on trouvera figure (I.5) le modèle d'irradiance utilisé dans [1] : on constate la très grande dépendance vis à vis de l'heure. La figure (I.6) complète la précédente en précisant, pour la ville d'alger, l'évolution annuelle de l'irradiance max I_{max} et de la durée du jour T_{day} . La nécessité de croiser précisément ces données avec un cahier des charges précisant la puissance requise par la charge s'impose clairement.

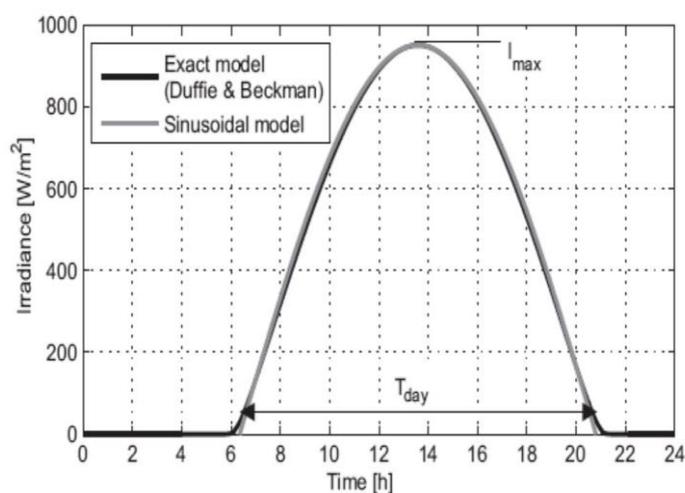


Figure (I.7) Deux modèles de l'irradiance en fonction de l'heure. Le modèle de Duffie et Beckman correspond à la référence

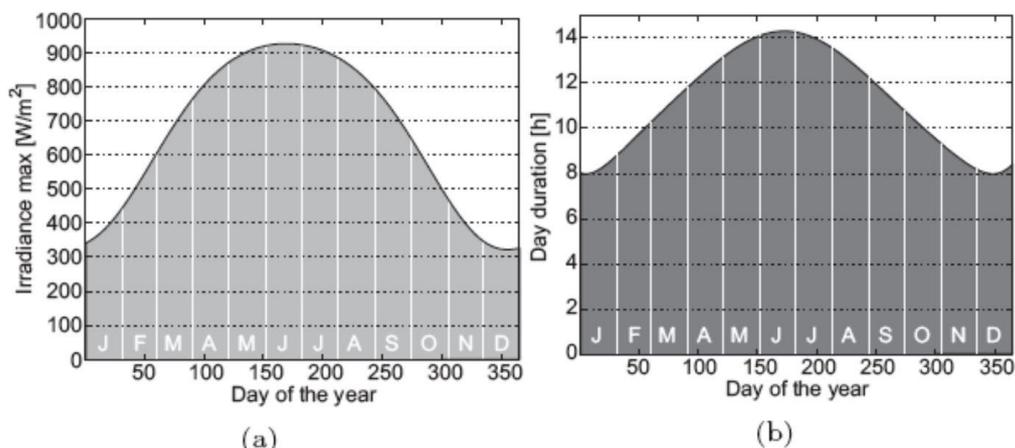


Figure (I.8) Evolution de I_{max} et de la durée du jour T_{day} pour la ville d'alger

1 L'ÉNERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE :

1.1 Généralités :

L'énergie solaire est la conversion de la lumière du soleil en électricité, soit en utilisant directement la technologie photovoltaïque (PV), ou indirectement en utilisant l'énergie solaire concentrée.

Les systèmes d'énergie solaire concentrée utilisent des lentilles ou des miroirs et des systèmes de poursuite pour concentrer une grande surface de lumière solaire en un petit faisceau. Les cellules photovoltaïques convertissent la lumière en un courant électrique en utilisant l'effet photovoltaïque. Des centaines de cellules photovoltaïques (également appelées cellules solaires) constituent un réseau solaire photovoltaïque (PV). Les cellules solaires sont les composants des panneaux solaires qui convertissent la lumière rayonnante du soleil en électricité qui est ensuite utilisée pour alimenter des appareils électriques et pour chauffer et refroidir les maisons et les entreprises. Les cellules solaires contiennent des matériaux aux propriétés semi-conductrices dans lesquels leurs électrons sont excités et transformés en courant électrique lorsqu'ils sont frappés par la lumière du soleil. Il existe des dizaines de variantes de cellules solaires, mais les deux types les plus courants sont ceux en silicium cristallin (monocristallin et polycristallin) et ceux en couche mince technologie. Les cellules solaires sont de différents types et présentent des caractéristiques différentes. Le type de cellule solaire utilisé dans un projet dépend de l'objectif du projet, de la disponibilité de la cellule, de l'efficacité et coût. Ils le sont :

Le silicium monocristallin

Le silicium polycristalline

La cellule de silicium amorphe (a-Si)

Le Tellure de Cadmium (CdTe)

Le Cuivre Indium Sélénium (CIS)

1. La cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique.

Les cellules photovoltaïques sont constituées :

- D'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent pas franchir sans excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électriques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité relativement bonne.
- D'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode.

Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissantes juste en dessous de semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.

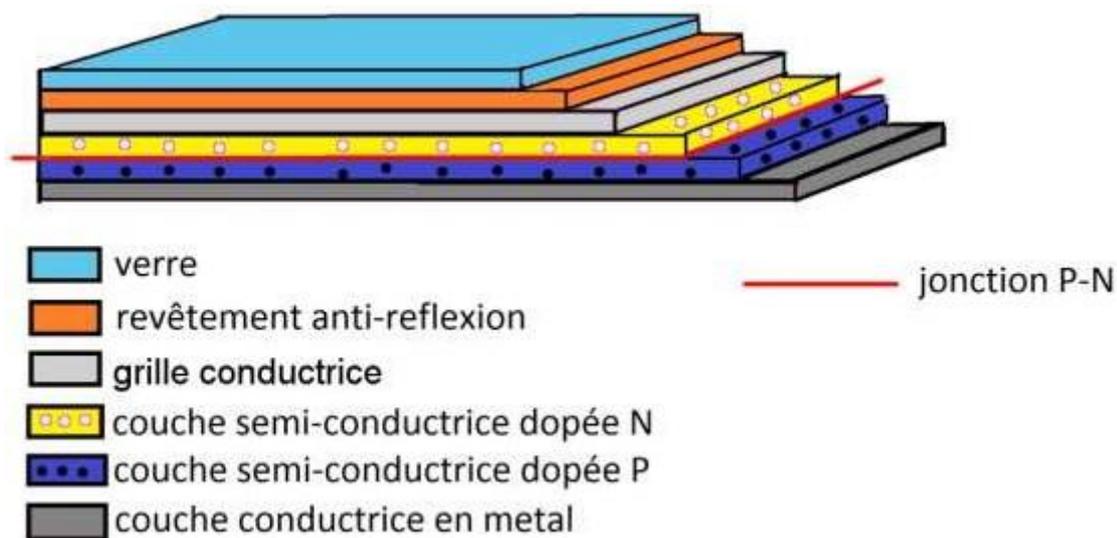
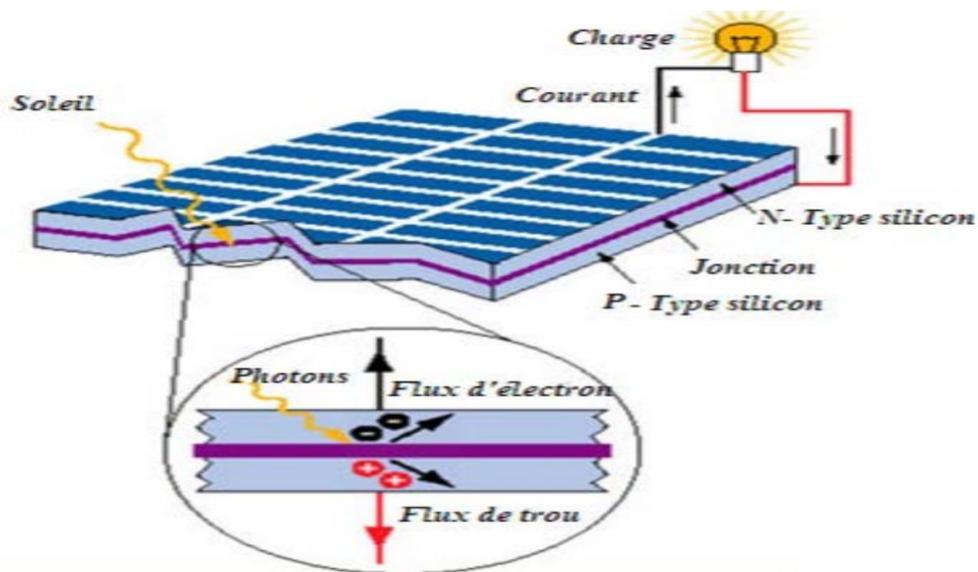


Figure (I.9) structure basique d'une cellule solaire.

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule

1.2 Principe de fonctionnement :

Ces cellules sont formées d'un matériau semi-conducteur en deux couches, principalement à base de silicium, l'une dopée positivement (P) et l'autre négativement (N). Il s'agit donc d'une jonction PN. La figure illustre le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, Lorsque'un électron est arraché, un "trou" se forme à l'endroit où l'électron est arraché et se comporte comme une charge positive. L'électron et le trou s'échappent de part et d'autre de cette jonction PN (les électrons vers N et les trous vers P), créant une différence de potentiel. C'est ainsi qu'une cellule photovoltaïque produit du courant électrique continu proportionnel à l'éclairage.



Figure(I. 10) Structure d'une cellule photovoltaïque utilisant le silicium comme matériau PV (présence d'une jonction PN)

2 Classification de cellules solaires :

La figure montre le schéma fonctionnel des différents types de cellules solaires

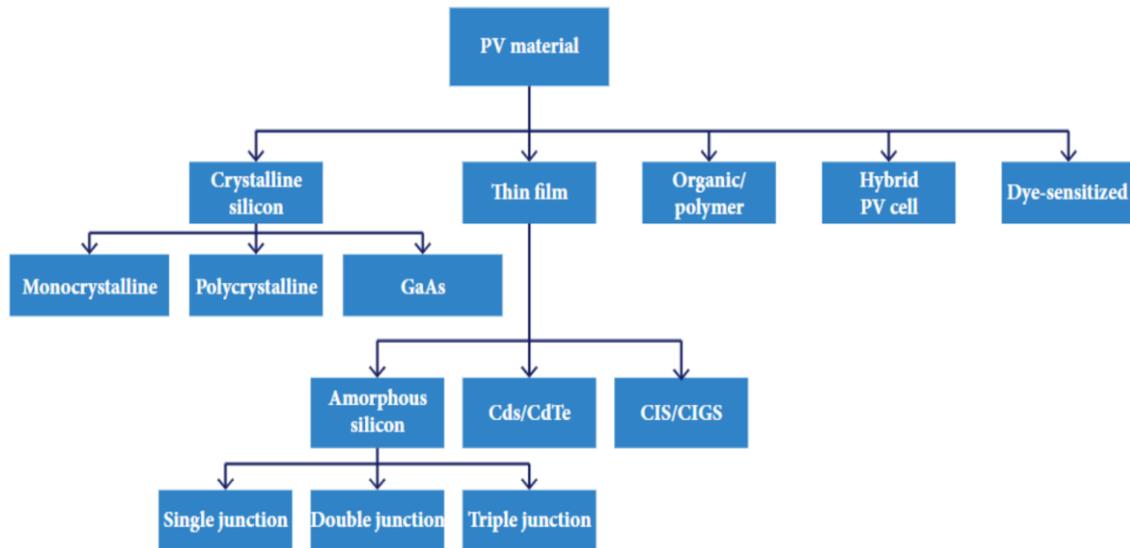


Figure (I. 11) Classification de la cellule photovoltaïque fondée sur du matériau photovoltaïque

2.1.1 **Matériau cristallin**

La cellule photovoltaïque à matière cristalline comprend les cellules monocristallines, polycristallines et arsenide de gallium (GaAs). Ils sont décrits comme suit :

2.1.1.1 **Le silicium monocristallin :**

est un type de cellule dont la structure et la forme sont uniques et uniformes et proviennent d'un seul cristal. Les cellules de silicium monocristallin s'appliquent principalement à la construction de panneaux photovoltaïques. La structure unique de la cire de silicium permet la mobilité des électrons à partir du matériau, ce qui améliore l'efficacité de la conversion d'énergie. Les cellules monocristallines sont utilisées pour des applications aériennes extérieures et solaires principalement en raison de leur épaisseur et de leur efficacité de conversion. Cependant, l'application des cellules monocristallines à des avions alimentés par l'énergie solaire est confrontée au problème de l'encapsulation de la cellule solaire sur l'aile cambrée de l'avion.

2.1.1.2 **Le silicium polycristalline**

se compose de grains de cristaux plus petits qui forment la structure moléculaire et qui créent également des limites entre eux. L'efficacité de conversion d'énergie des cellules en polycristallin est moins élevée que celle des cellules en silicium monocristallin en raison des limites du débit des électrons. L'efficacité de conversion d'énergie en polycristalline se situe

entre 10 et 14 %. Ces types de cellules photovoltaïques sont moins chers à fabriquer que le silicium monocristallin à cause du coût de production réduit.

2.1.1.3 L'arsenide de gallium (GaAs)

est un matériau semi-conducteur formé par une combinaison de Gallium (Ga) et d'arsenic (As). L'efficacité énergétique élevée de 30 à 40 % et la souplesse de la cellule solaire en font la meilleure application pour un avion alimenté par l'énergie solaire. La cellule solaire est souple et peut donc facilement se plier selon la forme du profil aérodynamique de l'aéronef. La cellule solaire est plus coûteuse qu'une cellule solaire monocristalline, et c'est pourquoi elle n'est pas largement utilisée.

2.1.2 Les filières dites « Couches Minces »

Ce type de cellule photovoltaïque est fabriqué directement à l'aide d'une mince couche semi-conducteur de matière photovoltaïque imprimée ou vaporisée sur un substrat de verre, de métal ou de papier d'aluminium. L'épaisseur de la cellule photovoltaïque est plus petite que celle de la cellule cristalline coupée. Les cellules à couche minces ont une capacité d'absorption de lumière plus élevée que les cellules cristallines et leur efficacité de conversion cellulaire est faible en raison de l'absence de structure cristalline.

2.1.3 La cellule de silicium amorphe (a-Si)

est constituée d'une mince couche d'extrait de silicium, mais non cristalline. Ce type de cellule s'applique aux petits produits électroniques à faible tension nominale. L'absorption lumineuse du silicium amorphe est 40 fois plus élevée que celle du silicium cristallin. L'efficacité des cellules PV est de 7 à 9 % et de 5 % lorsqu'elles sont exposées au soleil pendant quelques mois après leur installation. La faible efficacité de conversion énergétique affecte son application dans les avions à énergie solaire.

2.1.3.1 Le Tellure de Cadmium (CdTe)

Le rendement de conversion obtenu pour cette filière est nettement plus satisfaisant. Cependant la limite principale au déploiement de grande ampleur de cette technologie reste la toxicité du cadmium.

2.1.3.2 Le Cuivre Indium Sélénium (CIS)

Cette filière plus complexe à maîtriser présente un fort potentiel de développement dans le futur (jusqu'à 20% de rendement en laboratoire). Cependant, les matériaux nécessaires à la fabrication de ce type de cellule ne sont pas disponibles en grande quantité.



Figure(I. 12) Cellule amorphe

Figure (I. 13) cellule monocristalline

Figure(I. 14) cellule polycristalline

Tableau montre une brève comparaison des types de cellules solaires typiques dont nous avons parlé précédemment. et le rendement des modules de cellules solaires respectivement

Tableau (I, 1) : Comparaison des types de cellules solaires

	MONOCRYSTALLINE	POLYCRYSTALLINE	AMORPHES	CdTe	CIS/CIGS
Efficacité typique des modules	15-20%	10-14%	7-9%	9-11%	10-20%
Meilleure efficacité des cellules de recherche	25.0%	20.4%	13.4%	18.7%	20.4%
La surface requise pour 1 kWc	6-9 m ²	8-9 m ²	13-20 m ²	11-13 m ²	9-11 m ²
Durée typique de la garantie	25 ans	25 ans	10-25 ans		
Résistance à la température	Les performances baissent de 10 %. 15 % à des températures élevées	Moins résistant à la température que le monocristallin	Tolère la chaleur extrême	Un impact relativement faible sur les performances	
Informations complémentaires	La technologie cellulaire la plus ancienne et la plus utilisée	Moins de déchets de silicium dans le processus de production	Tendent à se dégrader plus rapidement que les panneaux solaires à base de cristaux		

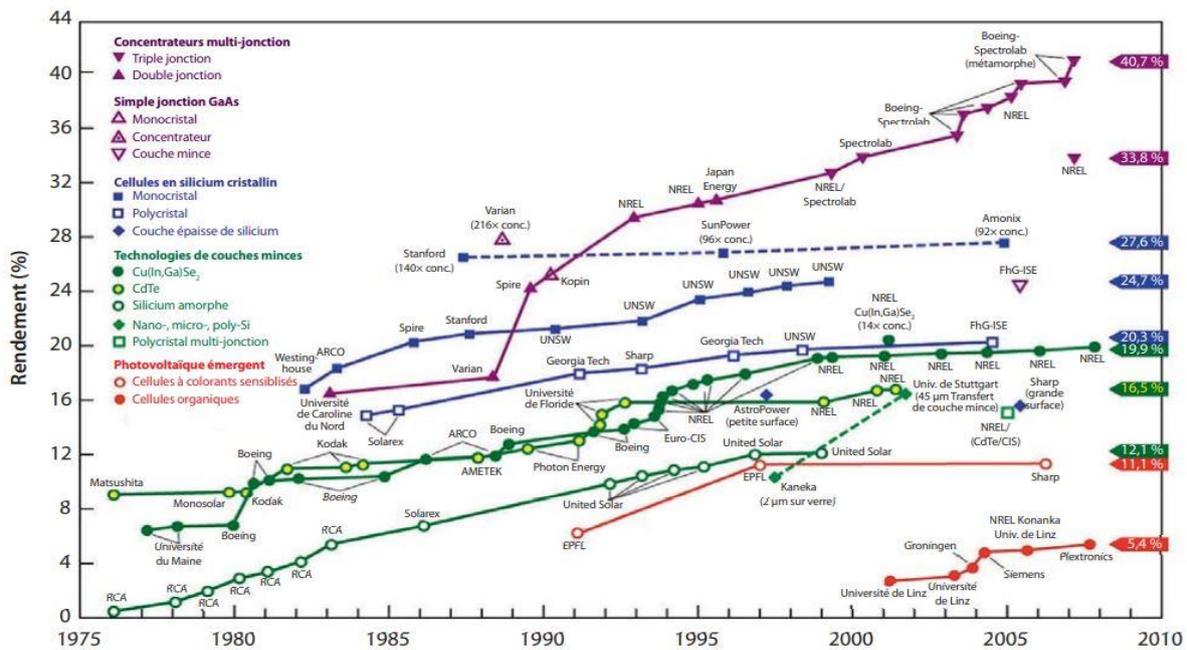


Figure (I. 15) L'évolution des différentes filières photovoltaïques

la figure résume l'évolution des différentes filières photovoltaïques depuis le démarrage il y a bientôt soixante ans. Les principales filières actuellement commercialisées, sont basées sur le silicium, celles au silicium cristallin pouvant atteindre des rendements de 25 % (en bleu sur la Figure 4) ; elles représentent 80 % du marché.

2.2 Efficacité et taille des cellules solaires

L'espace dont vous disposez pour les panneaux pv peut également influencer le type de technologie que vous choisissez. Les panneaux plus efficaces génèrent plus de puissance par mètre carré que les panneaux moins efficaces - idéal lorsque votre toit est petit ou partiellement ombragé. L'efficacité de chaque technologie peut être mesurée par le rendement maximum par mètre carré de cellules photovoltaïques.



Figure (I.16) rendement maximum par mètre carré de cellules photovoltaïques

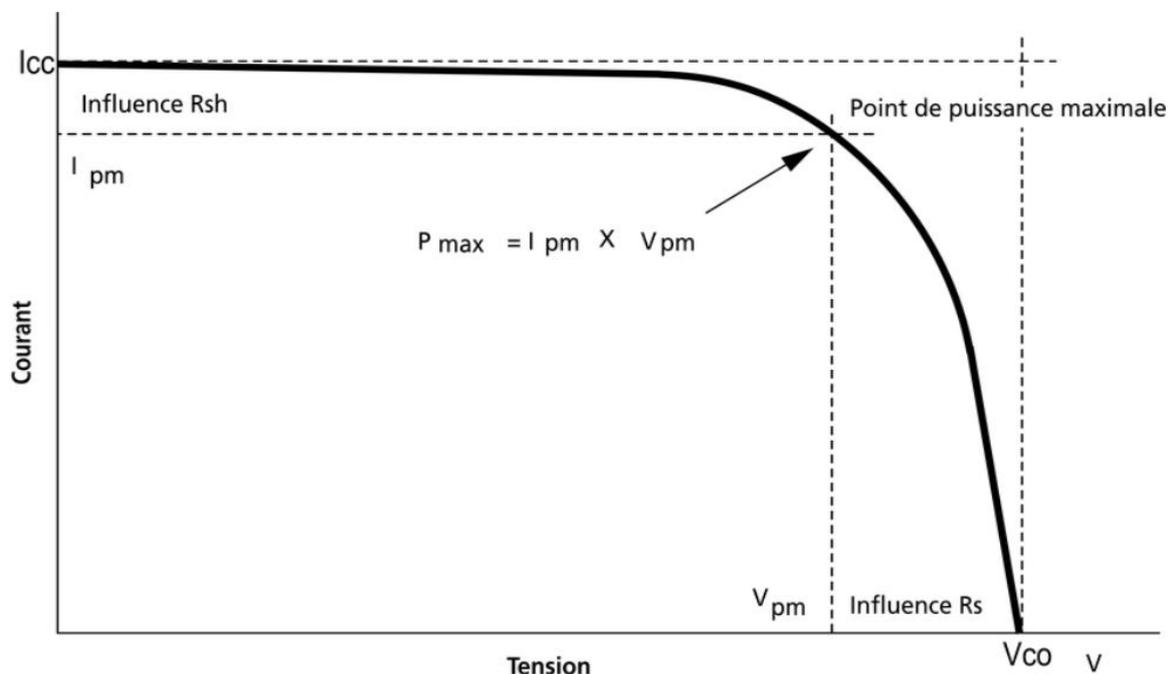
Les chiffres sont basés sur une taille de panneau typique pour chaque technologie. Les systèmes photovoltaïques sont modulaires et peuvent donc avoir n'importe quelle taille ou forme. Il existe quatre technologies photovoltaïques principales parmi lesquelles choisir et chacune présente des caractéristiques différentes.

C'est un autre facteur important à prendre en compte, les cellules monocristallines étant les plus efficaces et les plus chères. Comme la fonctionnalité est plus importante, les cellules monocristallines ont été choisies comme étant les mieux adaptées à cette application en raison de leur haut rendement. Une étude de marché réalisée sur Internet montre que les cellules monocristallines de La cellule monocristalline Sunpower C60 Maxeon est la mieux adaptée à cette application, et elle est rentable. La taille de chaque cellule solaire est d'environ 125 mm en longueur et en largeur selon sa fiche technique, et une combinaison de ces cellules en modules est nécessaire pour produire la puissance requise.

3 Le générateur photovoltaïque :

3.1 La courbe courant-tension :

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sont les suivantes :



Figure(I.17) La courbe représente la caractéristique d'un panneau photovoltaïque

I_{sc} : représente l'intensité de court-circuit (tension égale à 0).

V_{oc} : représente la tension circuit ouvert (courant égal à 0).

$P_{mpp} = V_{mpp} \cdot I_{mpp}$, est la puissance maximale que peut délivrer le panneau.

R_{sh} : La résistance série et la résistance parallèle, respectivement.

3.1.1 Courant de court-circuit (I_{cc}) :

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nul.

Dans le cas idéal (R_s nulle et R_{sh} infinie), ce courant se confond avec le photo-courant

3.1.2 Tension de circuit-ouvert (V_{co}) :

C'est la tension V_{co} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque)

3.1.3 Puissance maximale d'une cellule PV :

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximale P_{max} correspondrait donc à la tension de circuit ouvert V_{co} multipliée par le courant de court-circuit I_{cc} :

$$P_{max} = V_{co} I_{cc}$$

P_{max} (W) : La puissance fournie par la cellule PV.

V_{co} (V) : La tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule PV.

I_{cc} (A) : L'intensité de court-circuit débitée par la cellule PV.

4 Influence de l'éclairement et de la température :

4.1 Influence de l'éclairement solaire :

L'énergie électrique produite par une cellule photovoltaïque dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. La figure suivante représente la caractéristique courant-tension d'une cellule PV solaire en fonction de l'éclairement, à une température et une vitesse de circulation de l'air ambiant constantes. On remarque que la tension V_{max} correspondant à la puissance maximale ne varie que très peu en fonction de l'éclairement, contrairement au courant I_{max} qui augmente fortement avec l'éclairement.

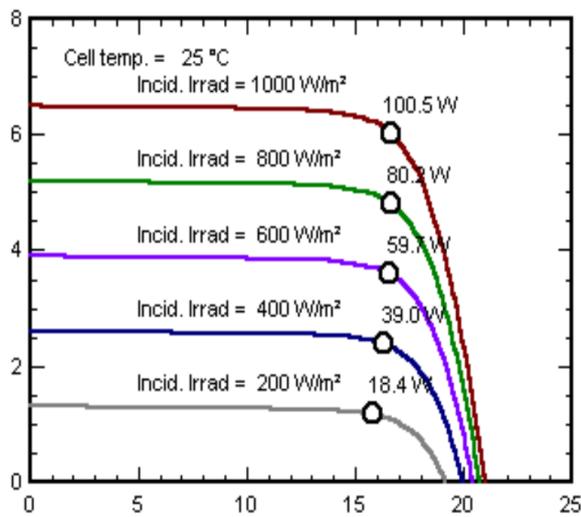


Figure (I. 18) Caractéristique courant-tension d'une cellule PV à température constante en fonction de l'éclairement

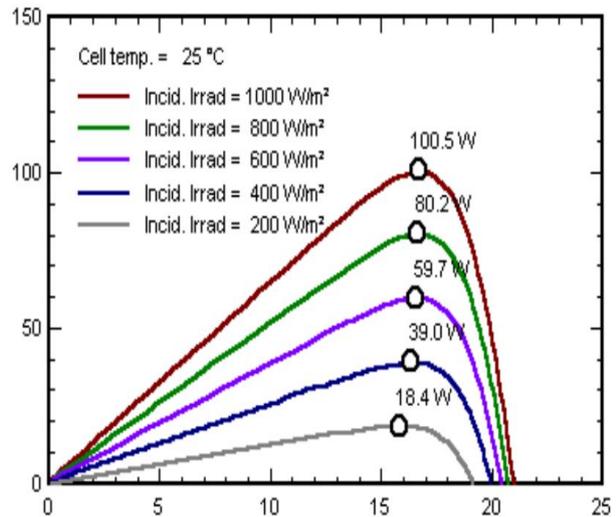


Figure I. 19 Influence de l'irradiation- Puissance en fonction de la tension

4.2 Influence de la température :

Les caractéristiques électriques d'une cellule PV dépendent de la température de jonction au niveau de la surface exposée. Plus la température augmente, plus le rendement diminue. Une augmentation de la température entraîne une chute importante de la tension, une légère augmentation du courant, globalement une perte non négligeable de puissance.

Les courbes suivantes représentent l'évolution du courant et de la tension en fonction de la température de jonction de la cellule

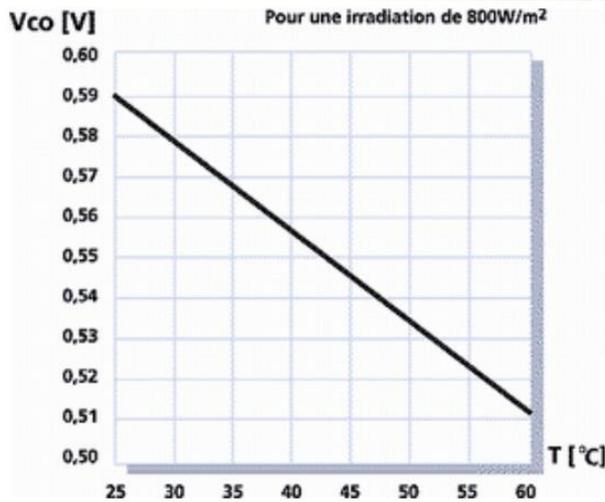
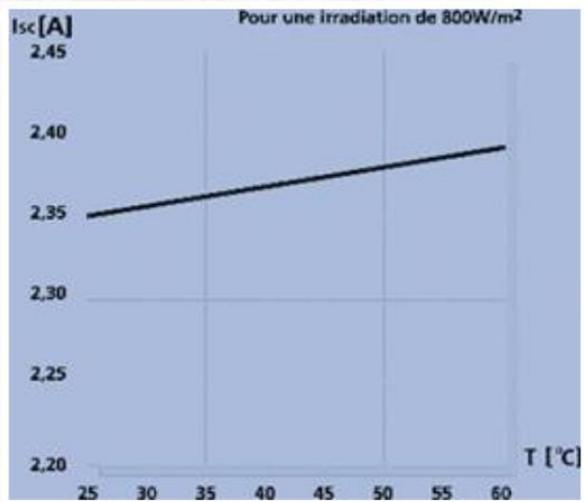


Figure (I.18) La tension V_{co} en fonction de la température



Figure(I.209) Intensité ICC en fonction de la température

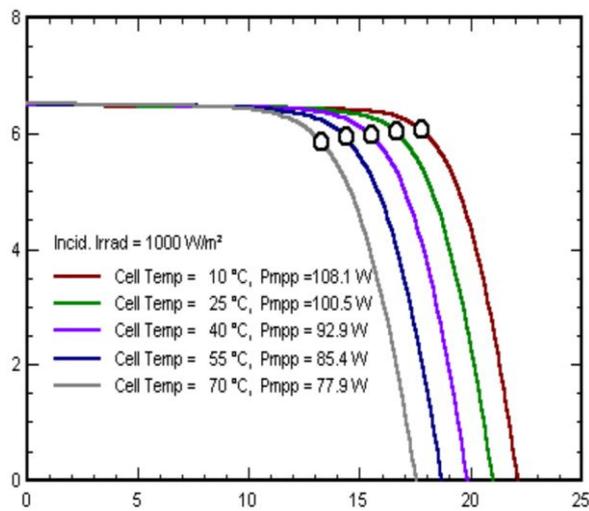


Figure (I.20)Caractéristique courant-tension d'une cellule PV à éclairement constant en fonction de la température

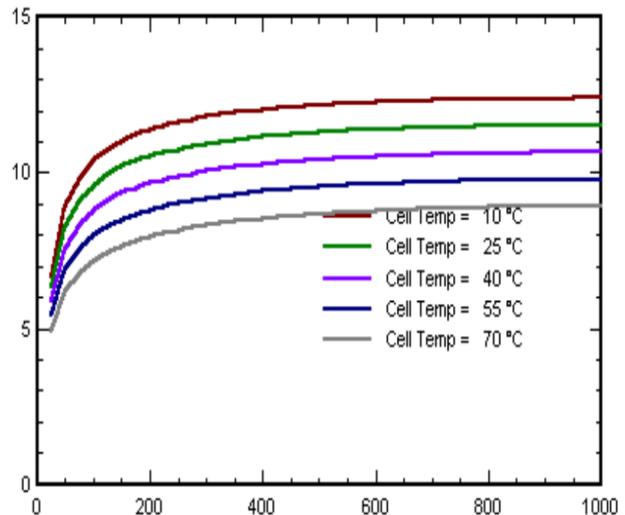


Figure (I.21) Influence de la température - Rendement en fonction de l'irradiation

5 Couplage des cellules photovoltaïques

5.1 Module photovoltaïque

Le module photovoltaïque est par définition un ensemble de photopiles assemblé pour générer une puissance électrique exploitable. En effet, une photopile élémentaire ne génère pas suffisamment de tension (entre 0.5 et 1.5 V selon les technologies). Un module photovoltaïque se compose généralement d'un circuit de 36 cellules en série. Afin d'obtenir des puissances de

quelques kilowatts, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en série et en parallèle pour former un panneau

5.2 Association série :

Dans un groupement de N_s cellules en série, la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, alors que le courant traversant des cellules reste le même.

La figure (I.22) montre la caractéristique résultante (I_{sc} , V_{sco}) avec :

$$I_{sc} = I_{cc} \text{ et } V_{sco} = n_s \times V_{co}$$

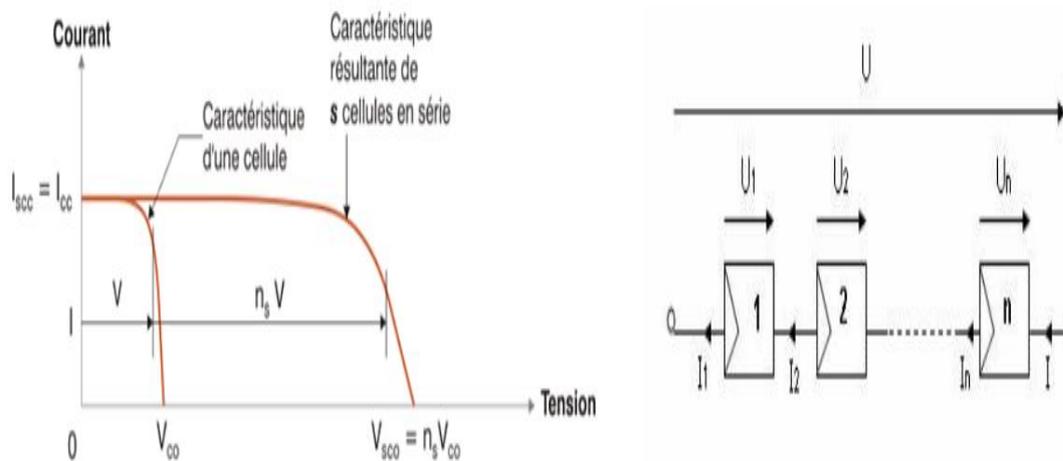


Figure (I.22) la caractéristique résultante obtenue en association en série

5.3 Association en parallèle :

Dans un groupement de N_p cellules en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par l'addition des courants.

La figure (I.23) montre la caractéristique résultante (I_{pcc} , V_{pco})

$$I_{pcc} = n_p \times I_{cc} \text{ et } V_{pco} = V_{co}$$

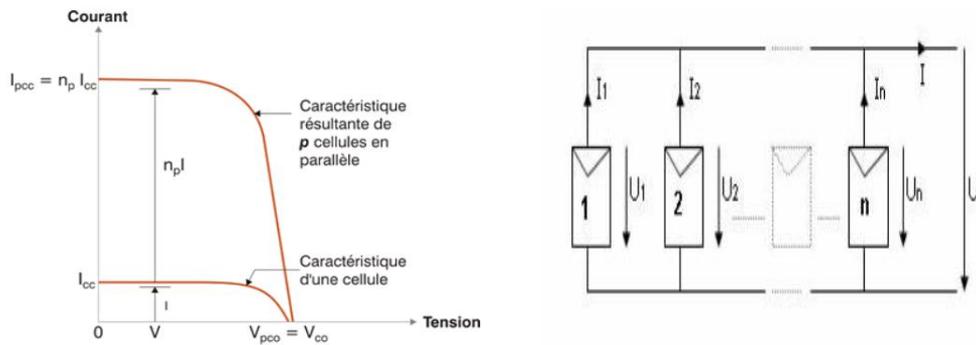


Figure (I.23) la caractéristique résultante obtenue en association en parallèles

5.4 Association en série/parallèle :

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

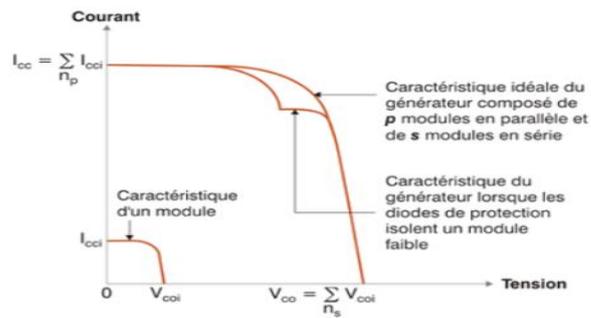


Figure (I.24) la caractéristique résultante obtenue en association en parallèles/série.

Chapitre II : Stockage d'énergie et régulateur

Stockage d'énergie électrique :

1 Historique :

La première batterie a été inventée par Alessandro Volta sous la forme d'une pile voltaïque dans les années 1800. Les batteries peuvent être classées en deux catégories :

-batteries primaires (pile) : dans ce cas la réaction électrochimique est irréversible, le générateur est déchargé une seule fois et de façon définitive

-batteries secondaires (batterie) : dans ce cas la réaction électrochimique est réversible, une source d'énergie extérieure peut être utilisée pour ramener les électrodes à leur état initial et charger le dispositif après sa décharge.

2 Principe de fonctionnement :

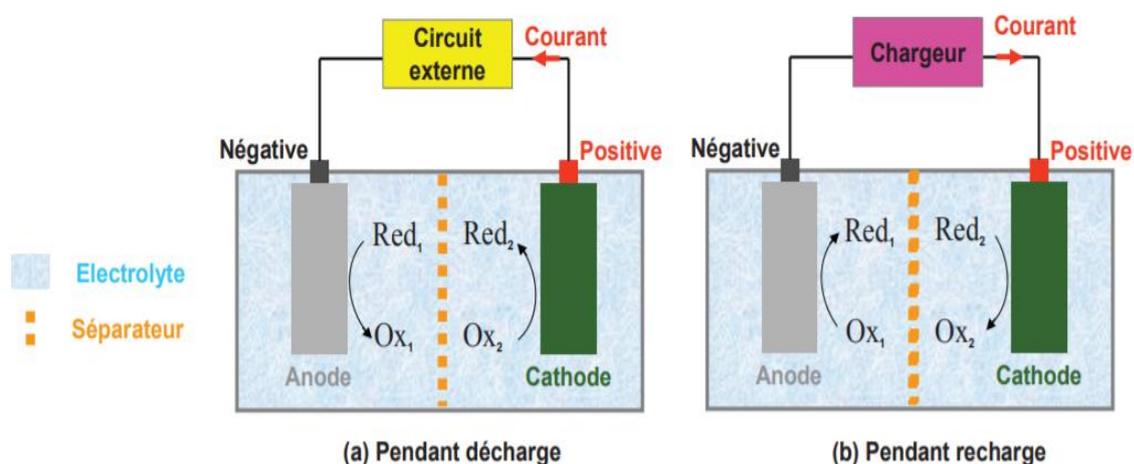
Il est nécessaire de comprendre les phénomènes chimiques de base gouvernant le fonctionnement des batteries afin de pouvoir justifier les choix des méthodes, des modèles.

Le fonctionnement de la batterie repose sur une double réaction chimique à chaque pôle de la batterie qui va opérer un transfert d'électrons entre l'anode et la cathode de la façon suivante :

a- l'anode cède des électrons : cette demi-réaction est une oxydation,

b- la cathode les récupère : cette demi-réaction est une réduction.

c- un électrolyte (un élément, liquide ou solide, conducteur permettant le passage du courant entre les deux pôles).



Figure(II.1) Principe de fonctionnement des accumulateurs

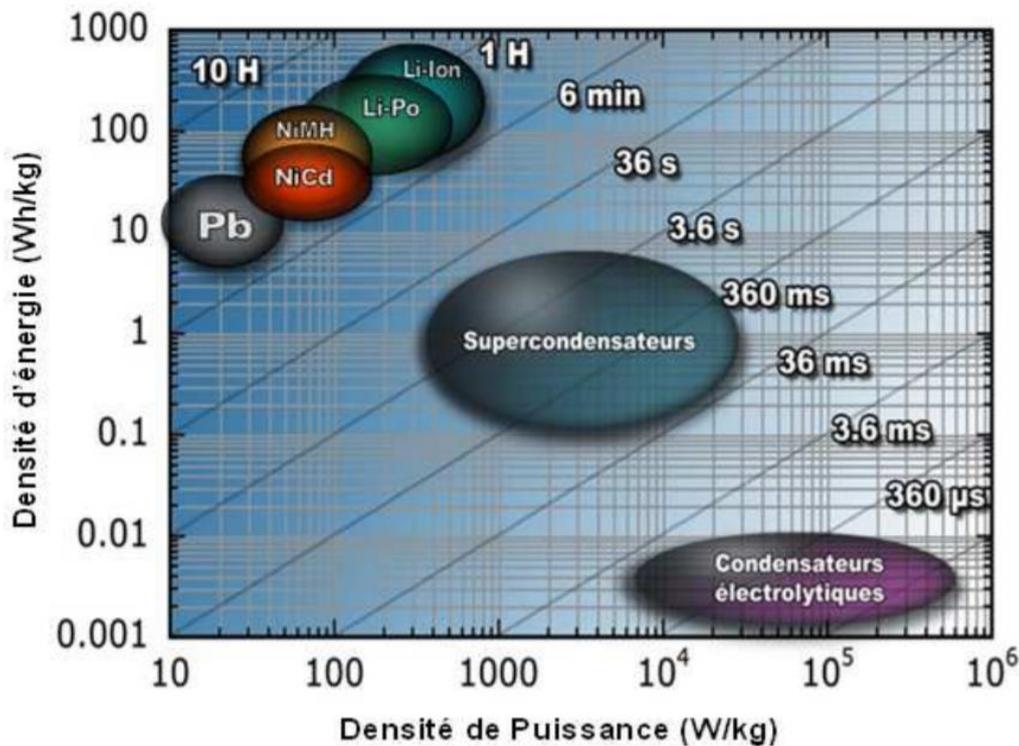
Chapitre II : Stockage d'énergie et régulateur

Une cellule est composée de deux électrodes plongées dans l'électrolyte. L'association de plusieurs cellules en série forme une batterie. Durant la réaction d'oxydo-réduction les électrons passent d'un pôle à l'autre de la batterie grâce aux ions. Un ion est un élément chimique (un atome ou une molécule) qui est électriquement chargé. Si un ion manque (respectivement possède trop) d'électrons il est chargé positivement (respec. Négativement). Dans une batterie, c'est la réaction chimique qui produit des ions grâce aux métaux qui constituent l'anode ou la cathode et grâce aux éléments chimiques présents dans l'électrolyte. Ainsi, le fonctionnement de la batterie repose sur l'utilisation de couples de métaux capables d'échanger des électrons

3 Type de technologie de stockage d'énergie :

Les différentes technologies rechargeables de stockage d'énergie existantes sont présentées sur la figure. Les technologies sont comparées en termes de densités d'énergie et de puissance. Cette figure est bien évidemment évolutive en fonction des progrès de la recherche, et certains systèmes peuvent devenir concurrents. Dans le domaine électrique, un accumulateur désigne un système physicochimique capable de convertir de façon réversible l'énergie électrique en énergie chimique. L'énergie électrique est donc accumulée, puis restituée en majeure partie. L'accumulateur n'est généralement pas utilisé seul, mais plusieurs sont associés en batterie. Comme indiqué sur la figure, il existe cinq technologies d'accumulateurs rechargeables d'usage courant : accumulateur au plomb (Pb), accumulateur Nickel cadmium (Ni-Cd), accumulateur NickelMetal Hydride (Ni-MH), accumulateur Lithium-ion (Li-ion) et accumulateur Lithium-ion polymère (Li-Polymer). L'avantage des accumulateurs est qu'ils peuvent stocker une grande densité d'énergie. Ils sont très performants pour délivrer cette énergie à régime constant. Par contre lorsqu'il y a un besoin de charge ou recharge rapide, les accumulateurs ne conviennent pas. C'est là qu'intervient la technologie des condensateurs et supercondensateurs. Charge et décharge peuvent se faire à très grande vitesse. Malheureusement leur densité d'énergie reste faible par rapport à celle d'accumulateurs.

Chapitre II : Stockage d'énergie et régulateur



Figure(II. 2) Diagramme de Ragone des systèmes électrochimiques rechargeables

3.1 Batteries Ni-Cd

Les batteries Ni-Cd ont été découvertes en Suède par Waldemar Jungner, qui déposa un premier brevet en 1899, qu'il étendit aux Etats-Unis en 1901. La batterie NI-Cd a une électrode positive en Nickel, et une négative en cadmium, et un électrolyte à base d'hydroxyde de potassium cette batterie a un cycle de recharger/décharge assez important plus que les autres batteries. Elle permet une recharger simple et rapide. Même après une longue durée de stockage.

Néanmoins, elle présente quelques inconvénients liés a son cout élevé, a la tension faible de chacune de ses cellules, et a son impact assez important sur l'environnement.

3.2 Batteries lithium-ion :

Au début des années 90, principalement sous l'impulsion des constructeurs japonais d'équipements portable, une batterie lithium est une batterie dont la réaction électrochimique fait intervenir le lithium. Cette batterie à une forte Energie spécifique et une grande densité d'énergie. De plus, elle n'a pas d'effet mémoire et elle a une faible autodécharge par rapport aux autres technologies de batteries. Nous distinguons plusieurs sortes de batteries lithium.

3.3 La batterie lithium-ion (Li-ion)

Chapitre II : Stockage d'énergie et régulateur

Où le lithium reste à l'état ionique grâce à l'utilisation d'un composé d'insertion aussi bien à l'électrode négative généralement (en graphite) qu'à l' »l cathode positive (dioxyde de cobalt manganèse phosphate)

3.4 La batterie lithium-polymère (Li-po)

Représente une alternative à la batterie lithium-ion. Elle délivre un peu moins d'énergie, mais elle est beaucoup plus sûre. L'électrode négative est en lithium, et l'électrolyte est un alliage de lithium et de fer

Contrairement aux autres batteries, les batteries lithium-Ion ne sont pas liées à un couple électrochimique. Tout matériau pouvant accueillir en son sein des ions lithium peut être à la base d'une batterie Lithium-Ion. Ceci explique la profusion de variantes existantes face à la constance observée avec les autres couples. Il est donc délicat de tirer des règles générales à propos de cette batterie. En outre, les marchés de forts volumes (électronique nomade) et de fortes énergies (automobile, aéronautique, etc.) n'ont pas les mêmes besoins en termes de durée de vie.

3.5 Batteries au plomb

La batterie au plomb a été inventée par l'ingénieur français Gaston Planté en 1860, et utilisée dans le premier véhicule en France (Jamais Contente) en 1881. Une batterie au plomb est un ensemble d'éléments en plomb-acide sulfurique. Ces éléments sont couplés en série, et réunis dans un même boîtier pour obtenir la tension souhaitée. La tension de la batterie au plomb dépend du nombre d'éléments qui la constituent. Chaque élément a une tension de 2 V et une batterie de 12 V sera dotée de 6 éléments.

3.6 Batteries Ni-MH

Des recherches sur un nouveau couple Ni-MH ont commencé en 1967. L'accumulateur est composé d'une électrode positive à base d'hydroxyde de nickel (NiOOH). Dans l'électrode négative, Le Cadmium est remplacé par un composé intermétallique hydratable. Ces deux électrodes sont isolées électriquement par une séparation. L'électrolyte utilisé est le même que pour le Ni-Cd.

Chapitre II : Stockage d'énergie et régulateur

Tableau (II. 1) : comparatif des caractéristiques principales pour les différentes technologies

	Batteries					Super condensateur
	Plomb	NiCd	NiMH	Li-ion	Li-Po	
Densité énergétique (Wh/kg)	15-40	45-80	60-120	110-160	80-130	0.5-10
Nombre de cycle de charge/décharge (200 à 300	500 à 1500	300 à 500	500 à 1000	200 à 300	>105
Autodécharge par mois	5%	20%	30%	10%	10%	50%
Voltage nominal d'une cellule	2V	1.2V	1.2v	3.6v	3.7v	0.7 à 2.7v
Plage de températures de fonctionnement	10 à 40 °C	0 à 45 °C	0 à 45 °C	0 à 45 °C	0 à 45 °C	-40 à 65°C
En charge En décharge	-20 à 60°C	-40 à 60°C	-20 à 60°C	-20 à 60°C	-20 à 60°C	
Commercialisé depuis	1970	1950	1990	1991	1999	2004

La comparaison des caractéristiques principales pour les différentes technologies est présentée dans le tableau ci-dessous. Il donne quelques données techniques approximatives sur les technologies existantes

4 Les principaux paramètres d'une batterie

Une batterie est caractérisée par les trois paramètres suivants :

4.1 La puissance utilisable ($P = V.I$) en kW :

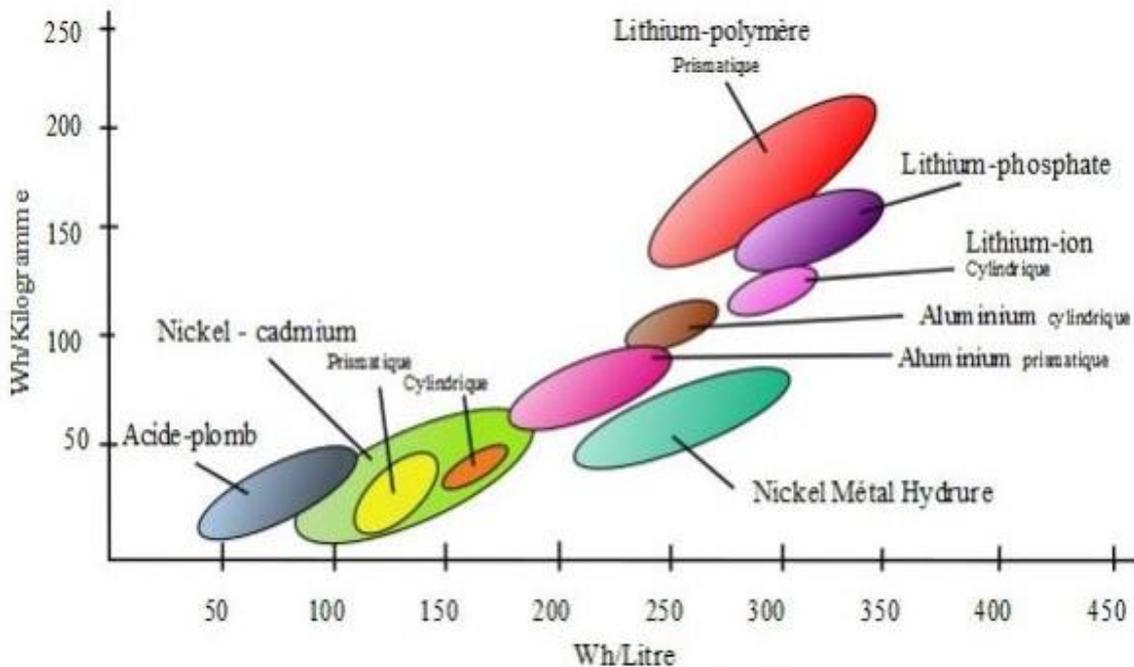
Il s'agit du produit de la tension de la batterie (V) par l'intensité maximale qu'elle peut débiter (I). La puissance utilisable doit être au moins égale à la puissance de pointe du moteur électrique afin de permettre son alimentation sur toute sa plage de fonctionnement.

4.2 La capacité :

La capacité massique : c'est une forme de l'énergie spécifique, définie comme le rapport entre l'énergie disponible d'une batterie ou d'une cellule et son poids. Elle est exprimée en Wh/Kg. La Figure présente la capacité massique (Wh/Kg) et une autre forme de l'énergie spécifique qui

Chapitre II : Stockage d'énergie et régulateur

est la capacité volumique (Wh/L), la présentation est faite en surface et non pas en valeur singulière afin d'illustrer les performances des différentes technologies de batteries



Figure(II. 3) La capacité de stockage des différents types d'accumulateurs

4.3 État de charge de la batterie (SOC).

Le SOC, en Anglais "State of Charge" est l'état de charge de la batterie à un moment donné. Ce paramètre s'exprime souvent en pourcentage %. Lorsqu'une batterie est complètement chargée, son état de charge est SOC = 100%.

4.4 Autodécharge :

En raison des réactions secondaires intervenant aux deux électrodes, la batterie se décharge toute seule lentement même quand elle n'est pas utilisée. Ce phénomène de perte d'énergie avec le temps est appelé autodécharge. L'autodécharge s'exprime souvent en pourcentage de la perte de charge par mois par rapport à la capacité de la batterie. Elle dépend de plusieurs facteurs comme la tension, la température et le vieillissement de la batterie. Elle varie aussi en fonction de la technologie de la batterie, par exemple, elle est de l'ordre de 5% par mois pour les batteries Li-ion et les batteries au plomb et de l'ordre de 30% par mois pour les batteries NiMH et NiCd

Chapitre II : Stockage d'énergie et régulateur

Tableau (II. 2) : L'autodécharge des différents systèmes de batteries

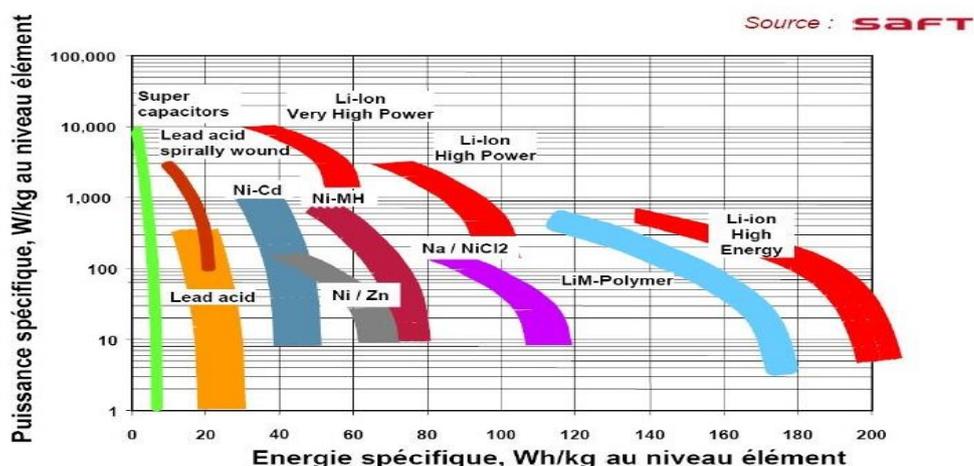
Type de batteries	L'estimation de l'autodécharge
Primaire	10 % en 5ans
Plomb-acide	5% par mois
Ni-Cd	10~15% en 24heurs, après 10-15% par mois
Ni-MH	30% (avec une résistance faible et grand capacité massique)
Li-Ion	5% en 24heurs, après 1-2% par mois, >3% pour les circuits à protection

4.5 Le taux-C :

Le courant de charge ou de décharge de la batterie d'accumulateurs est mesuré à un taux noté « C ». C'est-à-dire, une batterie d'accumulateurs de capacité 1 Ah peut fournir un courant de 1 A pendant une heure de décharge à un taux 1 C. La même batterie d'accumulateurs déchargée à un taux de 0,5 C fournir un courant de 0.5 A pour deux heures. A un taux de 2 C, la batterie va délivrer 2 A pendant 30 minutes. Donc, un taux de 1 C implique une décharge (ou charge) pendant une heure, 0,5 C correspond à 2 heures et 0,1 C à 10 heures de décharge (ou charge).

5 Comparaison entre les différentes technologies de batteries :

La Figure donne un panorama de différentes technologies d'accumulateur ainsi que le positionnement de chaque technologie sur le diagramme de Ragone (la puissance massique (W/kg) en fonction de l'énergie massique (Wh/kg)) qui permet de comparer les performances énergétiques de différentes technologies. Parmi les technologies d'accumulateur, la famille des batteries Li-ion présente les meilleures performances (en puissance et en énergie).



Figure(II. 4) Comparaison entre les différentes technologies de batteries

Chapitre II : Stockage d'énergie et régulateur

6 Régulateur de charge solaire :

6.1 Régulateur PWM (PULSE WITH MODULATION):

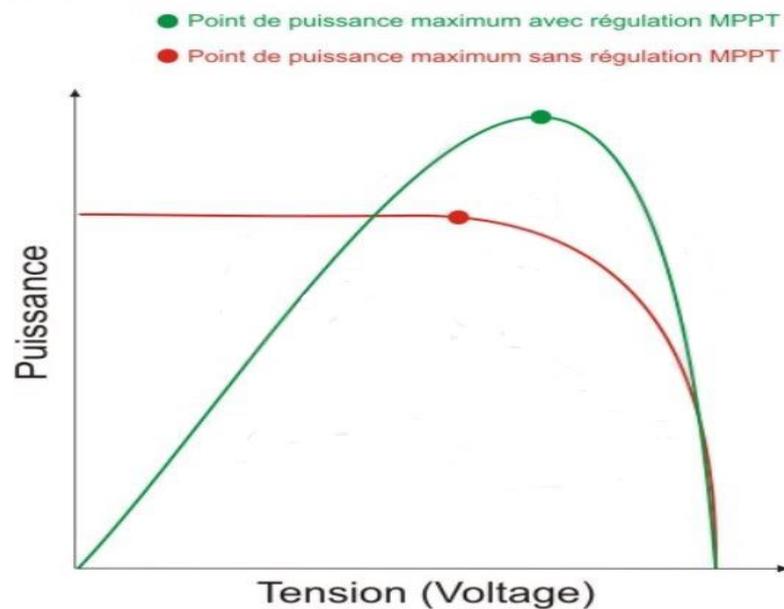
En utilisant des régulateurs de charge PWM traditionnels, le panneau solaire est « directement » relié à la batterie à charger. La batterie définit la tension de service du module. Par conséquent, la puissance de charge reste plus faible que si le régulateur était directement connecté avec le module. La puissance nominale d'un panneau solaire est toujours la résultante du produit tension et courant au point de travail optimal à 25°C.

Dans le cadre d'un système 12V, la tension de la batterie se situe entre 10-15V. Les panneaux solaires dits « 12V » classiques ont une tension réelle et maximale d'environ 17V. Par conséquent, dans la plage de tension 10-15V, la puissance disponible est diminuée ($P=U \times I$ donc si U diminue, P aussi). En fonction de l'état de charge de la batterie, les systèmes PWM conventionnels ne sont pas à même d'utiliser la puissance effectivement disponible. En moyenne, cela représente des pertes d'environ 20%.

6.2 Régulateur MPPT (MAXIMUM POWER POINT TRACKER):

Le tracker de point de puissance maximale piège le point de puissance maximale (MPP) sur la courbe I-V pour obtenir la puissance maximale de la cellule photovoltaïque. Les panneaux photovoltaïques ont des caractéristiques I-V non linéaires et la puissance de sortie dépend de l'état de l'irradiation solaire. Le MPPT est utilisé pour obtenir la puissance maximale disponible de la cellule photovoltaïque, car la position du MPP continue de fluctuer en fonction de l'évolution de l'irradiation solaire. Le MPPT suit la tension et le courant de fonctionnement du PV en fonction de la MPP et la verrouille, ce qui permet d'acheminer la puissance maximale du générateur PV vers les systèmes.

Chapitre II : Stockage d'énergie et régulateur



Figure(II. 5) Graphique du point maximum de puissance

Le MPPT est formé d'une composante d'efficacité de conversion de l'énergie. Différents algorithmes pour le MPPT sont disponibles, chacun avec des caractéristiques et un principe de fonctionnement différents

Le succès de l'énergie solaire dans les avions est une question fondamentale qui repose sur la précision de la poursuite du point de puissance maximale et le facteur de poursuite de l'énergie. Pour obtenir des performances optimales des avions à énergie solaire, un système de gestion de l'énergie avancé est installé dans ces avions, de sorte que les cellules photovoltaïques peuvent être au niveau du point de puissance maximale, que les hautes performances produisent de l'énergie pour la propulsion ou le mode de stockage de l'énergie.

7 La différence entre un régulateur PWM et MPPT

- **PWM** : Son rôle est de réguler la tension du panneau solaire. Il va récupérer la tension nécessaire auprès des panneaux pour recharger les batteries, en restituant la tension idéale à la période de charge de la batterie. Ils sont généralement utilisés pour des petites applications. Son avantage comparé au MPPT, est de pouvoir travailler correctement lorsqu'ils sont soumis à de fortes températures, ces régulateurs sont recommandés pour les pays chauds.

Chapitre II : Stockage d'énergie et régulateur

- **MPPT** : Il transforme la tension en intensité, c'est à dire qu'il convertit l'entière production solaire pour la ramener à la tension de batterie en augmentant l'intensité. Ce procédé augmente le rendement du système de 30% . Comparé aux régulateurs PWM, les MPPT ne fonctionnent pas lorsqu'ils sont soumis à de fortes températures.

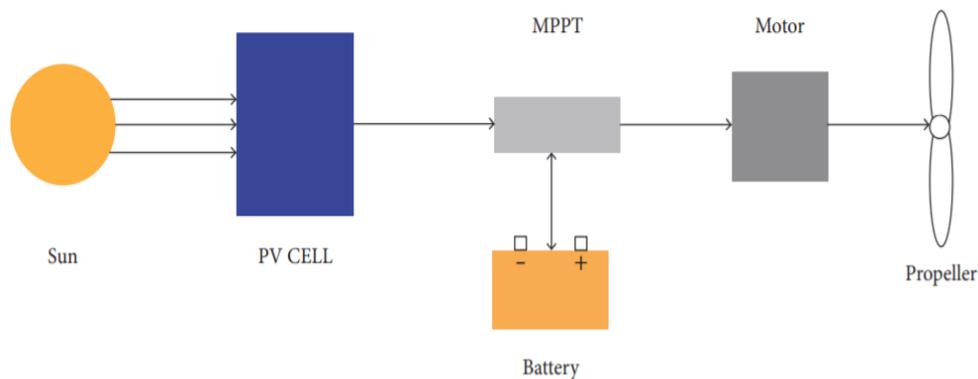
Enfin, le choix de la technologie du régulateur sera avant tout une histoire de coût. En effet, un régulateur MPPT est à l'achat plus cher qu'un PWM, due à son rendement (99% pour le MPPT contre 65% pour le PWM)

Tableau (II. 3) : comparative entre régulateur de charge PWM et MPPT

Régulateur PWM	Régulateur MPPT
Couplage direct du champ PV sur la batterie.	Charge de la batterie via un convertisseur de tension.
La tension nominale de la chaîne PV doit être compatible avec la tension nominale de la batterie.	La tension nominale de la chaîne PV peut être plus élevée que la tension nominale de la batterie.
Optimisation énergétique lorsque la température des modules est élevée et que la batterie est presque chargée.	Gain énergétique maximal lorsque la température des modules est basse et que la batterie est faiblement chargée.
Typiquement adapté pour petits systèmes PV (<200 Wc)	Envisageable pour des puissances PV > à 200 Wc
Nécessite l'emploi de modules de 36 cellules.	Possibilité d'utiliser des modules PV quel que soit le nombre de cellules
Champs PV dimensionné en courant (basé sur le courant de charge de la batterie)	Champ PV dimensionné en puissance (basé sur le courant max de charge batterie x la tension batterie)

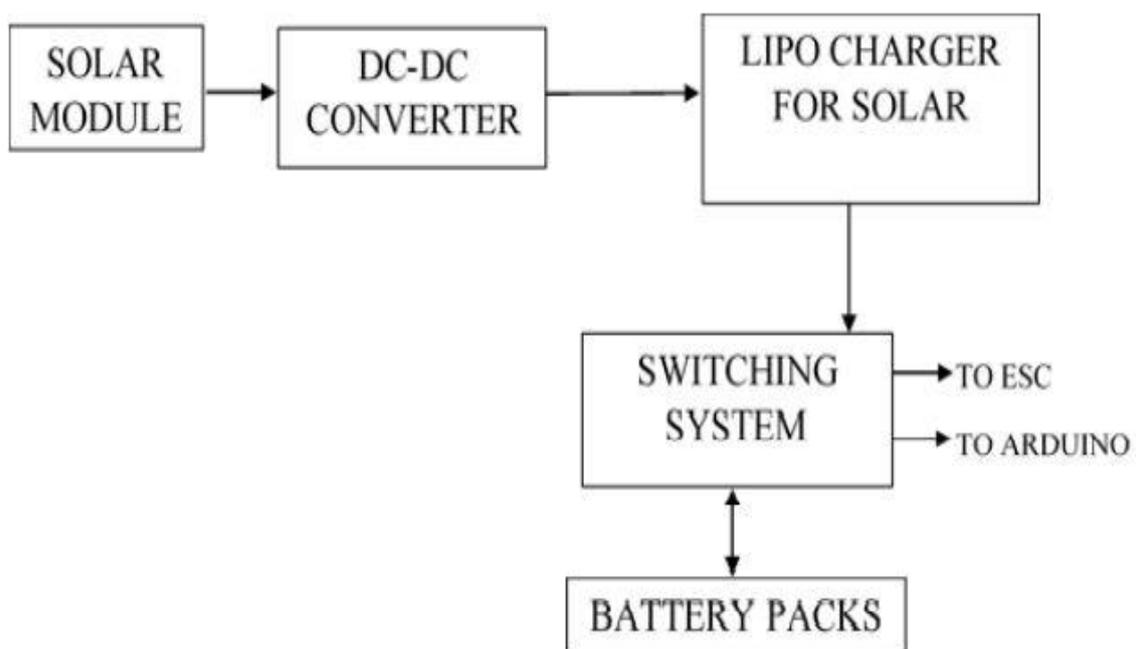
Chapitre III : Système

1 Système d'énergie solaire



Figure(III. 1) système d'alimentation par énergie solaire

Ce système est mis en place pour récolter l'énergie renouvelable obtenue à partir du soleil. Une fois que les rayons lumineux tombent sur les modules photovoltaïques, faits de matériau semi-conducteur, ils absorbent les photons provenant du soleil et transfèrent l'énergie aux électrons résidant dans le matériau semi-conducteur. Grâce à l'absorption de l'énergie des photons, ces électrons provoquent maintenant la circulation du courant dans le circuit électrique auquel les modules PV sont connectés. L'énergie produite par ces systèmes, pour cette application, doit être stockée. D'où le besoin de batteries. Les batteries pour cette application doivent être légères et avoir une grande capacité pour le fonctionnement efficace du système. Le système d'alimentation est décrit dans la figure (III.2).



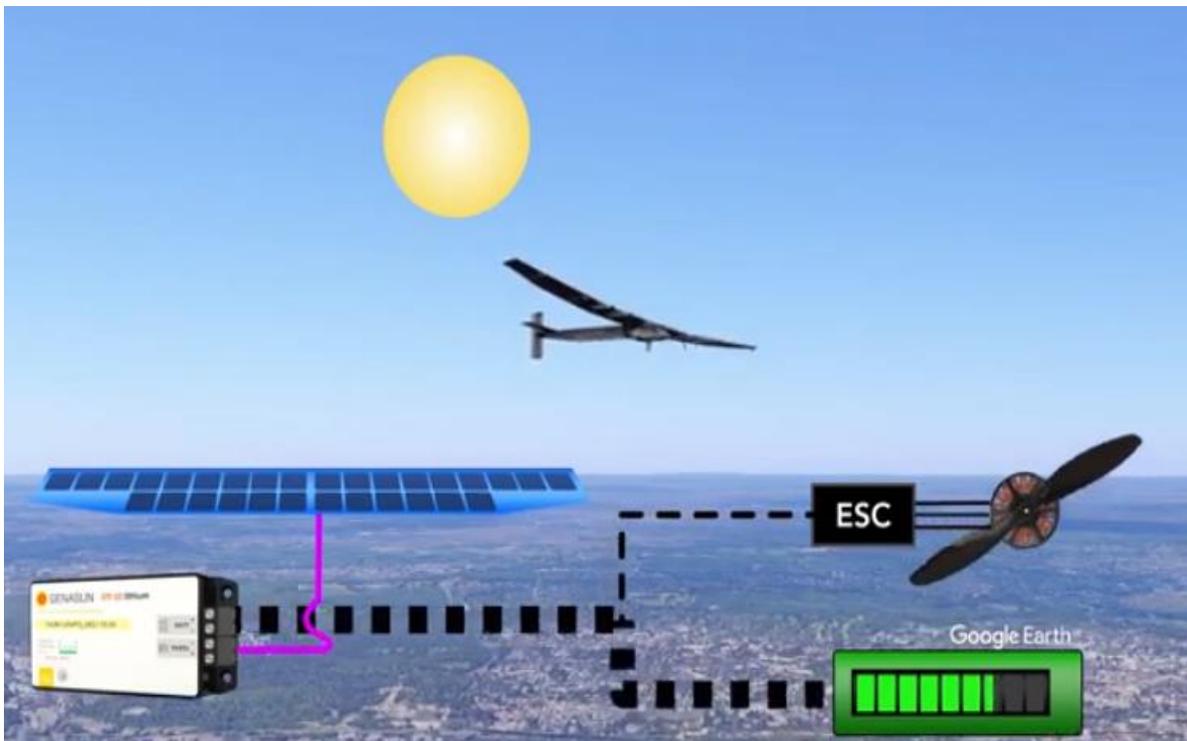
Figure(III. 2) système d'énergie solaire

Chapitre III : Système

De la figure, il a été déduit que les éléments suivants sont nécessaires pour

Ce système :

- Batterie
- Cellules solaires
- Régulateur de charge MPPT
- ESC contrôleur
- Moteur brushless A2212/13T
- Hélice



Figure(III. 3)représente les éléments de système

D'après la figure(III. 4) , les connexions de chaque module sont les suivantes :

Les cellules solaires sont connectées au système de charge LiPo solaire, qui à son tour est connecté au système de commutation puis au batterie. Le module de batterie se compose d'une batterie LiPo de 3 cellules qui alimentant les ESC, qui à leur tour alimentent respectivement le moteur sans balais et d'autres composants embarqués. Le rayonnement solaire tombe sur les

Chapitre III : Système

cellules solaires qui alimentent le système de charge LiPo, puis, par le biais du système de commutation, charge la batterie appropriée

2 Spécification des cellules solaires

C'est le premier point à prendre en considération. Il faut choisir la cellule solaire la mieux adaptée, capable de produire la puissance nécessaire à l'alimentation des composants embarqués, et pour ce faire, il faut faire une estimation de la consommation totale d'énergie de l'avion.

la puissance maximale consommée est de 167W.

En utilisant la cellule solaire Sunpower C60 Maxeon, ses spécifications, telles qu'elles ressortent de sa fiche technique, sont présentées dans le tableau

Bin	P_{MPP} (Wp)	Eff. (%)	V_{MPP} (V)	I_{MPP} (A)	V_{OC} (V)	I_{SC} (A)
G	3.34	21.8	0.574	5.83	0.682	6.24
H	3.38	22.1	0.577	5.87	0.684	6.26
I	3.40	22.3	0.581	5.90	0.686	6.27
J	3.42	22.5	0.582	5.93	0.687	6.28

Figure(III. 5) Spécifications de la cellule Sunpower C60[15]

Chapitre III : Système

3 Spécification du moteur sans balais (BLDC)

Le moteur sans balais est le mieux adapté aux applications aéronautiques en raison de :

Rapport poussée/poids

Haute efficacité

Pour choisir un moteur sans balais pour l'application, il faut de facto un moteur qui peut produire une poussée d'environ deux fois le poids de la maquette et de ses composants. Ce poids est généralement appelé le poids total

Les caractéristiques qui vont nous intéresser dépendent donc du type d'hélice, il s'agit de la poussée fournie en grammes (g) et de l'intensité du courant consommé en Ampères (A).



Figure(III. 6) Moteur brushless A2212/13T 1000 KV

Tableau (III, 1) : Les caractéristiques du moteur brushless A2212/13T [10]

Modèle	A2212
KV	1000 RPM/V
Efficacité Max	80%
Efficacité actuel Max	4-10A (>75%)
Capacité actuelle	13A / 60s
Aucune charge actuelle	10 V: 0,5 A-appliquer à l'ESC : . 30A
Dimension du Moteur	27,5 x 27mm
Diamètre de l'arbre	3.2 mm
Poids	47g
Puissance max	167 W
Résistance	0,09 ohms
Pôles	14

Chapitre III : Système

4 **Spécification du régulateur électronique de vitesse (ESC) :**



Figure(III. 7)Le contrôleur de vitesse L'ESC 30A

Le régulateur de vitesse dépend du type de moteur sans balais choisi. Il est sûr de choisir un ESC dont le courant nominal est 1,5 fois supérieur à l'appel de courant du moteur sans balais qu'il contrôle.

D'où

$$I_{ESS} \text{ actuel} \geq I_{BLDC} \text{ actuel} \times 1,5$$

En supposant que le moteur sans balais à une consommation de courant maximale d'environ 13A.

Ensuite,

$$I_{ESC} \text{ actuel} \geq 13 \times 1,5$$

$$I_{ESC} \text{ actuel} \geq 19,5A$$

5 **Spécification de la batterie**

La meilleure batterie pour les applications de vol général est la batterie au lithium

Piles à polymères. C'est grâce à leur :

Taux de décharge élevé

Haute capacité

Légèreté

Chapitre III : Système

Afin de choisir la bonne batterie, il faut tenir compte du BLDC, certains nécessitent des batteries LiPo à 3 cellules alors que d'autres exigent des batteries LiPo à 4 cellules. En choisissant une batterie LiPo à 3 cellules, les spécifications suivantes sont données :

TYPE DE BATTERIE : Lithium Polymère

NOMBRE DE CELLULES : 3

TENSION : 11,1V

TEMPS DE VOL ESTIMATIF : 15 minutes (0,25 heure)

CAPACITÉ = Consommation totale de courant × temps de vol (III.1)

A partir de l'hypothèse faite pour obtenir la spécification solaire :

$$\begin{aligned} \text{Consommation totale de courant} &= \frac{\text{consommation du moteur}}{\text{voltage de la batterie}} && \text{(III.2)} \\ &= \frac{167}{11.1} \end{aligned}$$

Consommation totale de courant = 15,04A

D'où l'équation,

Capacité de la batterie = 15,04 × 0,25 = 3,76Ah

Capacité : 3760mAh pour une durée de vol d'au moins 15mins.

5.1 Estimation du poids de l'avion :

La première étape est simple et n'implique pas de vrai calcul. On va déterminer le poids total de notre drone, y compris la batterie.

Tableau (III, 2) : Estimation du poids de l'avion(4) (5) (6)

Composant	Poids
Esc	10g
Moteur	47
Batterie	96g
Hélice	2g
La cellule pv	160g
mptt	150g
La maquette	400g

Totale :738g

Chapitre III : Système

5.2 Calculer la durée de vol

Notre avion pèse 738 g

Notre moteur fournie 817 g de poussée d'après l'annexe

Notre batterie est une 3S 1000 mAh 25C

On va pouvoir calculer maintenant tout un tas de choses

5.3 Rapport Poids/Poussée

Il s'agit du rapport entre le poids total et de la poussée fournie par le moteur. Plus celui-ci est bas, proche de 0, et mieux c'est. Dans l'idéal il est toujours inférieur à 0,5 (2 fois plus de poussée que le poids total de l'avion afin de pouvoir monter).

$$WTL = \frac{\text{poids}}{\text{poussée}} \quad (\text{III.3})$$

Dans notre cas l'avion pèse 738g et la poussée de moteurs et de 817g donc :

$$WTL = 738/817 = 0,9$$

5.4 Consommation en vol

Suivant les specs moteurs et en fonction de notre hélice et batterie, un moteur consomme 13.25A à pleine charge. Mais comme on n'a pas besoin de la pleine charge pour tenir en l'air on consomme un peu moins. On suppose que la consommation est linéaire, on multiplie donc ces 13.25A par le rapport WTL calculé précédemment.

$$\text{Conso} = 13.25 \times 0,9 = 11.92A .$$

En vol notre avion consomme donc 11.92A.

5.5 Durée de vol

Pour finir le calcul on va avoir besoin des caractéristiques de la batterie. Nous avons une batterie 1000 mAh (1 Ah). En pratique on ne décharge pas une LiPo en dessous de 25%. Nous avons donc une réserve d'énergie utilisable de $1000 \text{ mAh} \times 0,75 = 750 \text{ mAh}$.

Pour avoir une estimation on va donc simplement diviser ce réserve d'énergie par la consommation des moteurs calculée précédemment (en Ah pour avoir des heures) : **Temps de**

$$\text{vol} = \frac{0.75}{11.92} = 0,062 \text{ h} = \mathbf{3 \text{ minutes } 46 \text{ s}}$$

Chapitre III : Système

Voici un comparatif pour plusieurs batteries 3S :

Tableau (III, 3) : comparatif pour plusieurs batteries 3S

	Poids batterie (g)	Capacité batterie (mAh)	Poids de lavion (g)	wtL ratio	Durée de vol (m :s)
3S 1000 mAh	96g	1000 mAh	738	0.9	3.46
3S 1500 mAh	130g	1500 mAh	772	0.94	5.31
3S 1800 mAh	164g	1800 mAh	798	0.97	6.15
3S 2200 mAh	177g	2200 mAh	810	0.99	7.32
3S 3000 mAh	269g	3000 mAh	835	1.02	9.59
3S 4000 mAh	360g	4000 mAh	937	1.14	11.55
3S 5000 mAh	464g	5000 mAh	1002	1.22	13.50

6 Spécification Régulateur de charge

Le contrôleur de charge est l'interface entre la cellule photovoltaïque et la batterie qui contrôle la quantité de tension qui entre dans la batterie. En présence de la lumière du soleil, il s'assure que la batterie est chargée lorsque le quadripôle n'est pas allumé, et charger la batterie du quadriporteur pendant son vol, ce qui prolonge la durée totale du vol. Le contrôleur de charge se compose de :

Un convertisseur DC-DC et

Module de charge au lithium-polymère (LiPo).

Chapitre III : Système

Les modules solaires sont connectés au convertisseur DC-DC puis au module de charge LiPo module de recharge. Le convertisseur DC-DC est responsable de l'ajustement de la tension DC la sortie du module solaire à la suite de l'entrée du chargeur LiPo,

Le dimensionnement d'un régulateur de charge se fait selon 2 critères :

- La tension de batterie
- L'intensité de charge maximale acceptée par le régulateur doit être compatible avec la puissance des cellules et la tension de batterie selon la formule

$$I_{max} = \frac{P(wc)}{U_{batterie}} \quad (III.4)$$

Par exemple on prend le site de Ghardaïa dans ce site estimations du nombre des cellules c'est 30

$$P(Wc) = 30 \times 3.4 = 102 \text{ wc}$$

$$U_{batterie} (v) = 11.1 \text{ v}$$

$$I_{max} = \frac{102}{11.1} = 9.18A$$

On va choisir un régulateur de charge de marque GENASUN de (14.2V/10.5A)



Figure(III. 8) régulateur MPPT GENASUN

Chapitre III : Système

7 Estimation des coûts :

Estimation du cout de projet

Tableau (III, 4) : Estimation des coûts

Produit	Nom du producteur	Prix euro	Référence
Batterie 4000mah	XT60 - ManiaX	49.99	https://www.studiosport.fr/batterie-lipo-3s-4000mah-45c-xt60-maniac-a19378.html
Cellule PV	Sunpower c60	4*30	https://www.ebay.fr/itm/5-pcs-Sunpower-Solar-Cell-incl-5-x-Dog-Bone-Connector/143695491806?hash=item2174eb32de:g:tMcAAOSwsiBeeyah
Moteur hélice esc	A2212 1000KV moteur brushless avec 30A esc helice GWS HD 10x6	25	https://www.ebay.fr/itm/A2212-1000KV-Moteur-Brushless-30A-ESC-Helice-De-Controle-De-Vitesse-Pour-/193392973828
Régulateur	Genasun	119	https://batterie-marine.com/regulateur-solaire-bateau/151-regulateur-solaire-genasun-gv-10-boost.html

4x 30= 120 euros coût total des cellules solaires

Total =313 euros

Chapitre IV : Dimensionnement de système photovoltaïque

1 Procédure de calcul :

La principale difficulté dans le dimensionnement d'un système à panneaux photovoltaïques réside dans l'évaluation de l'énergie réellement consommée par l'équipement d'usage. Celle-ci dépend de l'utilisation qui va en être faite et n'est donc pas toujours facile à déterminer. Cette étape est importante car c'est le point de départ d'une étude de dimensionnement. Le dimensionnement d'un système photovoltaïque se fait en suivant une démarche par étapes que l'on peut résumer comme suit :

1.1 Estimation du besoin d'électricité (E_{cj}) :

Il s'agit de déterminer la quantité d'énergie consommée par le moteur au cours d'une journée. Pour cela, deux paramètres sont importants, le nombre d'heures d'utilisation de l'équipement dans une journée et la puissance de fonctionnement de celui-ci en Watts (W). La formule reliant ces trois paramètres est donnée par :

$$E_{cj} = Nhj \times P_{élec} \quad (IV.1)$$

Avec :

E_{cj} : Energie consommée par le moteur (Wh/jour).

$P_{élec}$: Puissance nominale du moteur (W).

1.2 Puissance des cellules requise (P_g) :

La puissance requise par les modules photovoltaïques est donnée par la relation (IV.2)

$$P_g = \frac{E_{cj}}{K H_d} \quad (IV.2)$$

K : Facteur de régulation (K=0.85).

H_d : Durée d'insolation (h/jour).

1.3 Puissance unitaire du module (P_u) :

Cette puissance dépend d'une part de l'énergie solaire reçue et de la durée du jour. Cette puissance unitaire ne doit jamais dépasser la puissance crête de ce module (P_{max}).

La puissance unitaire est donnée par :

Chapitre IV : Dimensionnement de système photovoltaïque

$$P_u = P_r \cdot S \cdot \eta \quad (\text{IV.3})$$

P_r : Puissance solaire reçue (W/m^2).

S : Surface du module (m^2).

η : Rendement du module photovoltaïque.

Avec :

$$P_r = \frac{E_s}{D_j} \quad (\text{IV.4})$$

D_j : durée du jour (du lever au coucher de soleil).

E_s : irradiation journalière (Wh/m^2).

2 Estimation du nombre des cellules photovoltaïques :

Le nombre des cellules nécessaire pour le générateur photovoltaïque est le rapport entre la puissance du champ requis et la puissance unitaire du cellule.

$$Nm = \frac{P_g}{P_u} \quad (\text{IV.5})$$

2.1 Association des cellules :

Une fois le nombre de cellules est connu, nous déterminons la configuration nécessaire équivalente à l'association série-parallèle des ces cellules.

2.1.1 Association en série :

Elle consiste à évaluer le nombre de cellules dans chaque branche. Cette configuration est déterminée en fonction direct de la tension de travaille du système et la puissance optimale.

Soient,

V_m : tension des cellules au point de la puissance maximale.

V_t : tension de travail du système photovoltaïque.

N_{ms} : nombre de cellules en série de chaque branche, alors, la relation (IV.6) doit être satisfaite :

$$N_{cs} = \frac{V_t}{V_m} \quad (\text{IV.6})$$

Chapitre IV : Dimensionnement de système photovoltaïque

2.1.2 Association parallèle :

C'est le nombre de branche N_{cp} de N_{cs} modules en série, nécessaire à mettre en parallèle dans le générateur. La connaissance de N_c et N_{cs} permet de déduire N_{cp} par la relation suivante (IV.7) :

$$N_{cp} = \frac{N_c}{N_{cs}} \quad (IV.7)$$

L'énergie consommé par l'électrolyseur (E_{cj}) est assurée par un système photovoltaïque, pour cela on calcul les différents grandeurs de ce système PV :

3 Dimensionnement du système photovoltaïque :

Le dimensionnement du système solaire photovoltaïque a pour but de déterminer la puissance du générateur photovoltaïque à partir des données d'ensoleillement du lieu, et des besoins en énergie électrique.

3.1 Energie solaire incidente (Es):

L'irradiation mensuelle incidente sur une surface de 1 m² **horizontale** pour les sites d'Alger, Ghardaïa et Tamanrasset en utilisons [METEONORM version 7.3] est :

3.2 Présentation du logiciel METEONORM :

METEONORM est un logiciel collaboratif qui facilite les exports vers TRNSYS du CSTB ainsi que vers de nombreux autres logiciels de simulation en Énergie solaire et Bâtiment. Il s'adresse aux ingénieurs, architectes, enseignants, concepteurs et toute personne qui s'intéresse à l'énergie solaire et à la climatologie.

Ce logiciel contient une base très exhaustive de données météorologiques mais également des algorithmes permettant de créer, à partir des valeurs mesurées, des fichiers météo de n'importe quel endroit sur le globe.

Chapitre IV : Dimensionnement de système photovoltaïque



Figure(IV.1) interface du logiciel METEONORM

Le logiciel METEONORM, proposé par le CSTB, permet :

- d'agrèger les données de 8.325 stations météo, les données interpolées et les données importées
- de calculer des valeurs horaires de tous les paramètres en utilisant un modèle stochastique
- d'inclure des modèles de changement climatique

Une multitude de paramètres sont obtenus : azimut solaire et d'élévation

- rayonnement planétaire, diffus et faisceau, rayonnement sur les plans inclinés
- rayonnement de grande longueur d'onde
- intensité lumineuse
- spectres UVA / UVB, rayonnement érythémateuse
- précipitations, pluie battante
- paramètres d'humidité (point de rosée, humidité relative, rapport de mélange, température psychrométrique), impact de la ligne d'horizon...

Chapitre IV : Dimensionnement de système photovoltaïque

3.3 Caractéristique du site d'Alger, Ghardaïa et Tamanrasset :

Située au bord de la mer méditerranéennes en nord d'Algérie, ses coordonnées géographiques sont les suivantes :

Tableau (IV, 1) : Caractéristique du site d'Alger, Ghardaïa et Tamanrasset

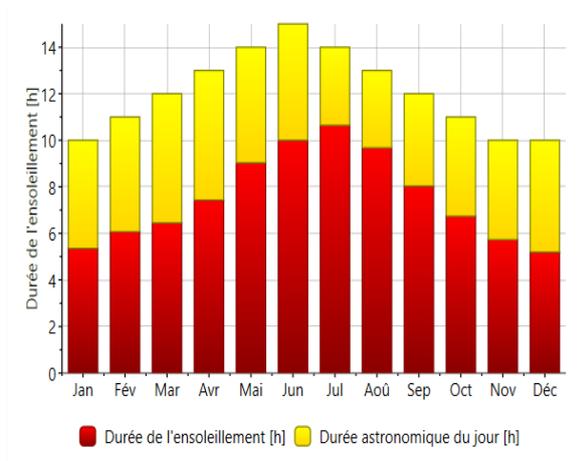
Site	Longitude	Latitude	Altitude
Alger	3.15° Est	36.43°	116 m
Ghardaïa	3.48° Est	32.24°	468 m
Tamanrasset	5.31° Est	22.47°	1377 m



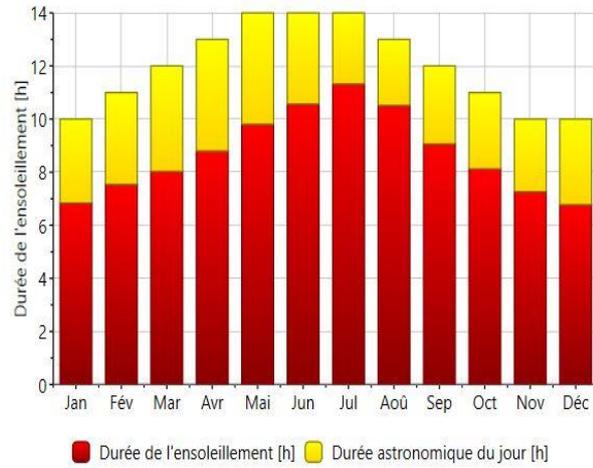
Figure(IV.2) image satellite montre la situation géographique du site d'Alger Ghardaïa Tamanrasset

Chapitre IV : Dimensionnement de système photovoltaïque

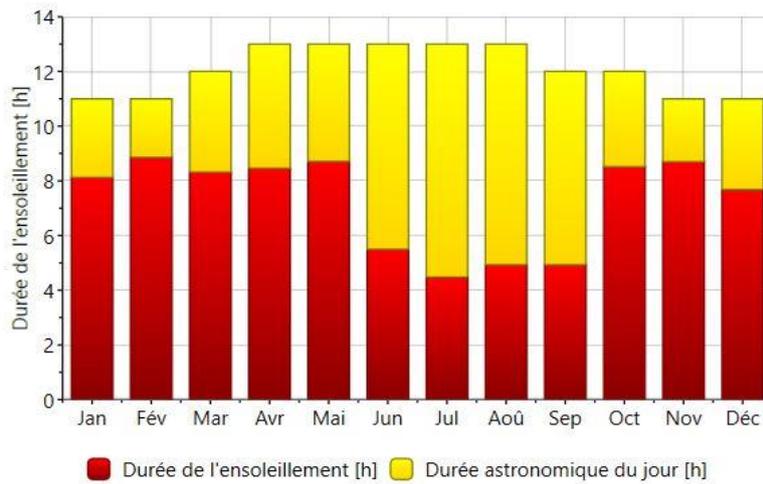
4 la durée d'insolation mensuelle :



Figure(IV. 3) La durée d'insolation du site d'Alger



Figure(IV. 4) La durée d'insolation du site de Ghardaïa



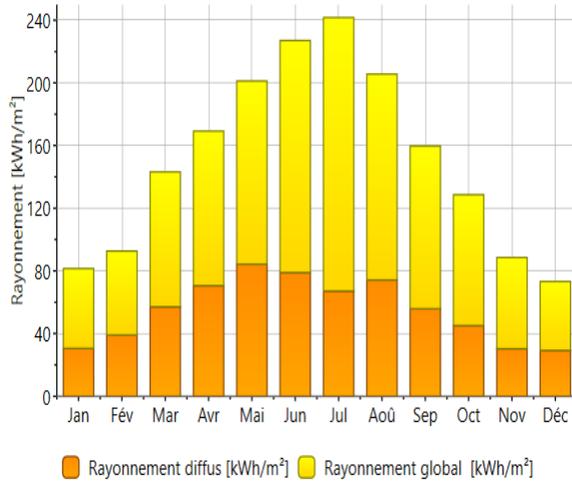
Figure(IV.5) La durée d'insolation du site de Tamanrasset

- $H_d = \frac{\text{la somme des heures de 12 mois}}{12}$

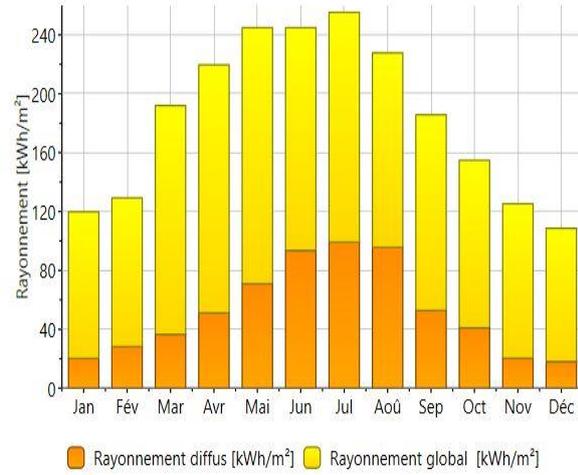
- H_d pour Alger : 7.5 h/j
- H_d pour Ghardaïa : 8.6 h/j
- H_d pour Tamanrasset : 7.2 h/j

Chapitre IV : Dimensionnement de système photovoltaïque

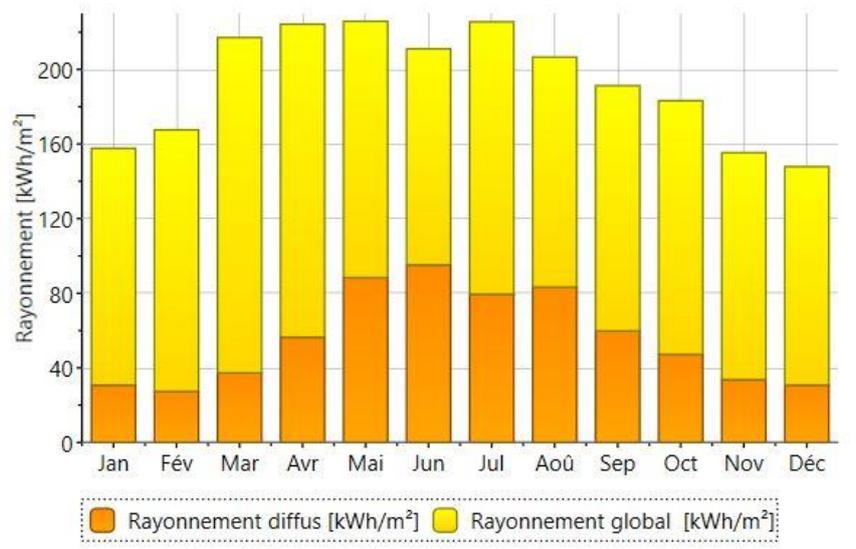
5 **Irradiation mensuelle incidente sur un plan horizontal :**



Figure(IV. 6)Irradiation mensuelle du site d'Alger



Figure(IV. 7)Irradiation mensuelle du site de Ghardaïa



Figure(IV. 8) Irradiation mensuelle du site de Tamanrasset

Tableau (IV, 2) : irradiation mensuelle incidente sur une surface horizontale pour les différents sites étudiés en kWh/m²

	Alger	Ghardaïa	Tamanrasset
Janvier	81	114	161
Février	93	122	162
Mars	143	170	206
Avril	169	192	214
Mai	201	214	226
Juin	216	209	218

Chapitre IV : Dimensionnement de système photovoltaïque

Juillet	215	211	230
Août	193	193	217
Septembre	160	168	192
Octobre	129	139	179
Novembre	89	112	155
Décembre	73	101	148
Annuelle	1759	1944	2307

6 Calcul de l'énergie consommée par jour (E_{cj}) :

On va déterminer la quantité d'énergie consommée par le moteur pendant 2h d'utilisation

$$E_{cj} = 2h \times 167W = 334Wh$$

6.1 Calcule puissance des cellules requise (P_g) :

C'est la puissance des cellules requise pour les trois sites

$$P_g = \frac{334}{0.85 \times Hd}$$

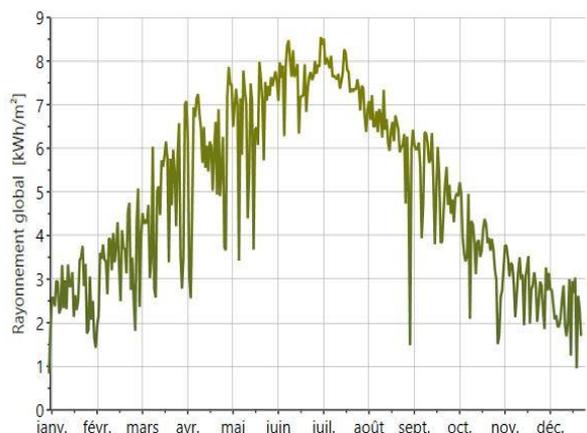
- (P_g) pour Alger : 53.10 W
- (P_g) pour Ghardaïa : 45.69 W
- (P_g) pour Tamanrasset : 54.49 W

Tableau (IV, 3) : Caractéristiques la cellule solaire utilisé[15]

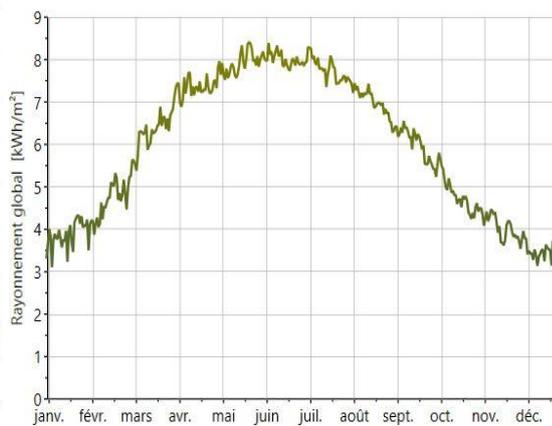
• Puissance crête P_c	3.46 [W]
• Tension maximale	0.55 [V]
• Courant crête	6.29[A]
• Courant de court circuit I_{cc}	6.78[A]
• Tension de court circuit V_0	0.649[V]
• NOTC	25 [°C]
• Rendement du module	22.5%
• Longueur	125 [mm]
• Largeur	125 [mm]
• Surface	0.015625[m ²]

Chapitre IV : Dimensionnement de système photovoltaïque

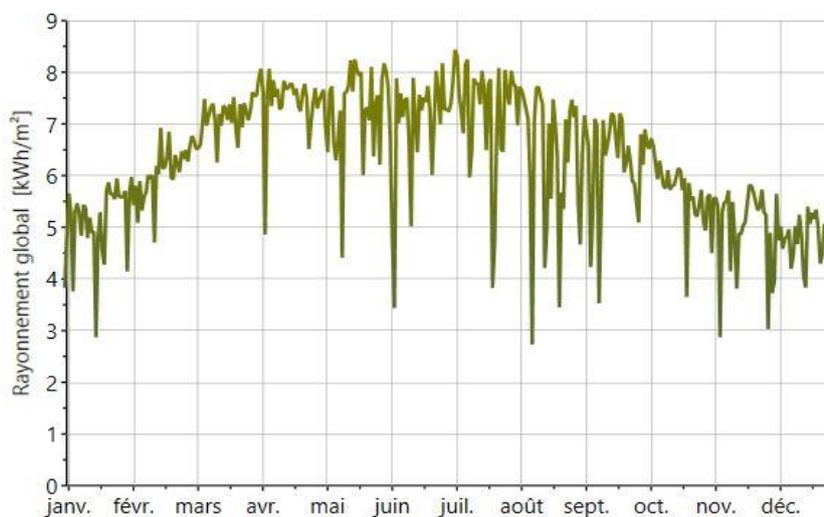
6.2 Rayonnement globale journalier :



Figure(IV. 9)Rayonnement globale journalier d'Alger



Figure(IV. 10) Rayonnement globale journalier de Ghardaïa



Figure(IV. 11)Rayonnement globale journalier de Tamanrasset

6.3 Puissance solaire reçue (Pr) :

$$Pr = \frac{E_s}{D_j}$$

$$E_s = \frac{\text{Irradiation annuelle}}{365}$$

$$D_j = \frac{\text{la somme des heures de 12 mois (du lever ou coucher de soleil)}}{12}$$

Chapitre IV : Dimensionnement de système photovoltaïque

- La dure du jour c'est 12h pour les trois sites
 - E_s pour Alger = 4819 Wh/m^2
 - E_s pour Ghardaïa = 5326 Wh/m^2
 - E_s pour Tamanrasset = 6320 Wh/m^2
- La puissance reçue on trouve
 - P_r pour Alger = 401.5 W
 - P_r pour Ghardaïa = 433.33 W
 - P_r pour Tamanrasset = 526.66 W

6.4 Puissance unitaire de la cellule (P_u) :

$$P_u = P_r \times S \times \eta$$

Ce qui donne :

- P_u pour Alger = 1.41 W
- P_u pour Ghardaïa = 1.52 W
- P_u pour Tamanrasset = 1.85 W

7 Estimation du nombre de cellules :

$$N_c = \frac{P_g}{P_u}$$

Ce qui donne :

- N_c pour Alger = 37.65 donc on utilise 38 cellules
- N_c pour Ghardaïa = 30.05 donc on utilise 30 cellules
- N_c pour Tamanrasset = 29.45 donc on utilise 30 cellules

7.1 Le nombre de cellules connectés en série :

$$N_{cs} = \frac{V_t}{V_m}$$

Chapitre IV : Dimensionnement de système photovoltaïque

On choisi la tension de fonctionnement en fonction de la puissance crête du champ photovoltaïque en watt

Tableau (IV, 4) : tension du champ en fonction de sa puissance crête

La puissance crête (wc)	Moins de 500wc	De 50wc a 2000wc	De 2001wc A 10000wc	Plus de 10000wc
La tension de champ (v)	12	24	48	96

Donc on prend 12v pour notre système par ce que la puissance requise est inferieur de 500 Wc

Ce qui donne :
$$N_{cs} = \frac{12}{0.55}$$

- N_{cs} pour Alger = 21.81 donc on utilise 22 cellules
- N_{cs} pour Ghardaïa = 21.81 donc on utilise 22 cellules
- N_{cs} pour Tamanrasset = 21.81 donc on utilise 22 cellules

7.2 Le nombre de cellules connectés en parallèles :

$$N_{cp} = \frac{Nc}{Ncs}$$

Ce qui donne :

- N_{cp} pour Alger = 1.72 donc on utilise 2 cellules
- N_{cp} pour Ghardaïa = 1.36 donc on utilise 2 cellules
- N_{cp} pour Tamanrasset = 1.36 donc on utilise 2 cellules

Chapitre IV : Dimensionnement de système photovoltaïque

Tableau (IV, 5) : performances de l'installation

Paramètre	Symbole	valeur
Irradiation annuelle moyenne reçue par le plan incliné	E _s	Alger : 4819Wh/ m ²
		Ghardaïa : 5326wh/m ²
		Tamanrasset : 6320wh/m ²
Durée d'insolation moyenne annuelle	H _d	Alger : 7.5 h/jour
		Ghardaïa : 8.6 h/jour
		Tamanrasset : 7.2 h/jour
Puissance des cellules requis	P _g	Alger :53.10 W
		Ghardaïa : 45.69 W
		Tamanrasset :54.49 W
Durée du jour moyenne annuelle	D _j	Alger : 12 h
		Ghardaïa :12 h
		Tamanrasset : 12h
Puissance solaire reçue	P _r	Alger : 401.5W/m ²
		Ghardaïa : 433.33W/m ²
		Tamanrasset :526.66W/m ²
Puissance unitaire	P _u	Alger : 1.41 w
		Ghardaïa : 1.52w
		Tamanrasset : 1.85
Nombre de cellules photovoltaïques	N _c	Alger :38
		Ghardaïa : 30
		Tamanrasset :30
Nombre de cellules associées en série	N _{cs}	Alger :22
		Ghardaïa :22
		Tamanrasset : 22
Nombre de cellules en parallèle	N _{cp}	Alger : 2
		Ghardaïa :2
		Tamanrasset : 2

8 Calcule pour le mois plus défavorable :

Pour les trois sites le mois plus défavorable c'est décembre

On a le même besoin énergétique

$$E_{cj} = 2h \times 167W = 334Wh$$

8.1 Calcule puissance des cellules requise (P_g) :

C'est la puissance des cellules requise pour les trois sites

$$P_g = \frac{334}{0.85 \times Hd}$$

Chapitre IV : Dimensionnement de système photovoltaïque

- La dure d'isolation pour mois de décembre
 - H_d pour Alger = 5h/j
 - H_d pour Ghardaïa = 6h/j
 - H_d pour Tamanrasset = 7.5h/j

- La puissance des cellules requise pour le mois de décembre
 - P_g pour Alger = 78.58 w
 - P_g pour Ghardaïa = 65.49 w
 - P_g pour Tamanrasset = 52.39 w

8.2 Puissance solaire reçue (P_r) :

$$Pr = \frac{E_s}{D_j}$$

$$E_s = \frac{\text{Irradiation mois de décembre}}{31}$$

- E_s pour Alger = 2354.8 Wh/m²
- E_s pour Ghardaïa = 3258 Wh/m²
- E_s pour Tamanrasset = 4774.2 Wh/m²

D_j : mois de décembre

- D_j pour Alger = 10h/j
- D_j pour Ghardaïa = 10h/j
- D_j pour Tamanrasset = 11h/j
-

Ce qui donne :

- P_r pour Alger = 235.48 W
- P_r pour Ghardaïa = 325.8 W
- P_r pour Tamanrasset = 434 W

Chapitre IV : Dimensionnement de système photovoltaïque

8.3 Puissance unitaire de la cellule (P_u) :

$$P_u = Pr \times S \times \eta$$

Ce qui donne :

- P_u pour Alger = 0.82 W
- P_u pour Ghardaïa = 1.14 W
- P_u pour Tamanrasset = 1.52 W

9 Estimation du nombre de cellules :

$$N_m = \frac{P_g}{P_u}$$

Ce qui donne :

- N_m pour Alger = 95.82 donc on utilise 96 cellules
- N_m pour Ghardaïa = 57.44 donc on utilise 58 cellules
- N_m pour Tamanrasset = 34.46 donc on utilise 35 cellules

9.1 Le nombre de modules connectés en série :

$$N_{cs} = \frac{V_t}{V_m}$$

Ce qui donne :

- N_{cs} pour Alger = 21.81 donc on utilise 22 cellules
- N_{cs} pour Ghardaïa = 21.81 donc on utilise 22 cellules
- N_{cs} pour Tamanrasset = 21.81 donc on utilise 22 cellules

9.2 Le nombre de cellules connectés en parallèles :

$$N_{cp} = \frac{N_c}{N_{cs}}$$

Ce qui donne :

- N_{cp} pour Alger = 4.36 donc on utilise 5 cellules

Chapitre IV : Dimensionnement de système photovoltaïque

- N_{cp} pour Ghardaïa = 2.63 donc on utilise 3 cellules
- N_{cp} pour Tamanrasset = 1.59 donc on utilise 2 cellules

Tableau (IV, 6) : performances de l'installation pour le mois le plus defavorable

Paramètre	Symbole	valeur
Irradiation mois de décembre	E_s	Alger : 2354.8Wh/ m ²
		Ghardaïa : 3258wh/m ²
		Tamanrasset : 4774.2wh/m ²
Durée d'insolation mois de décembre	H_d	Alger : 5 h/jour
		Ghardaïa : 6 h/jour
		Tamanrasset : 7.5 h/jour
Puissance des cellules requis	P_g	Alger :78.58W
		Ghardaïa : 65.49 W
		Tamanrasset :52.39 W
Durée du jour mois de décembre	D_j	Alger : 10 h
		Ghardaïa :10 h
		Tamanrasset : 11h
Puissance solaire reçue	P_r	Alger : 235.48W/m ²
		Ghardaïa : 325.8W/m ²
		Tamanrasset :434 W/m ²
Puissance unitaire	P_u	Alger : 0.82 w
		Ghardaïa : 1.14w
		Tamanrasset : 1.52w
Nombre de cellules photovoltaïques	N_c	Alger :96
		Ghardaïa : 58
		Tamanrasset :35
Nombre de cellules associes en série	N_{cs}	Alger :22
		Ghardaïa :22
		Tamanrasset : 22
Nombre de cellules en parallèle	N_{cp}	Alger : 5
		Ghardaïa :3
		Tamanrasset : 2

Chapitre IV : Dimensionnement de système photovoltaïque

10 **Conclusion générale** :

Avec le désir actuel d'une société plus verte, une source d'énergie alternative pour les avions est nécessaire. Il existe de nombreuses solutions énergétiques alternatives qui sont prometteuses, notamment les biocarburants et les piles à combustible à hydrogène, mais rien n'est aussi illimité que la technologie solaire. L'application des petits drones à énergie solaire peut potentiellement être très importante, que ce soit pour la surveillance météorologique, l'étude des catastrophes naturelles ou la détection des incendies. Les progrès de la technologie solaire ont fait que le concept de drones à énergie solaire n'est plus seulement une théorie. Les avions à énergie solaire peuvent constituer une partie importante de l'avenir de l'aviation et peuvent être une solution pour une société plus verte.

Liens utiles

- (1) <http://solar-panels.findthebest.com/>
- (2) <http://www.siliconsolar.com/commercial-solar-cells.html>
- (3) <http://www.siliconsolar.com/1400ma-077w-commercial-solar-cell-p-501122.html>
- (4) <http://www.amazon.fr>
- (5) <http://www.ebay.com>
- (6) <http://www.alibaba.com>

Référence Bibliographique

[1]Baschel, S.; Koubli, E.; Roy, J.; Gottschalg, R. Impact of Component Reliability on Large Scale Photovoltaic Systems' Performance. *Energies* 2018, 11, 1579.

[2]Bright, J.M.; Smith, C.J.; Taylor, P.G.; Crook, R. Stochastic generation of synthetic minutely irradiance time series derived from mean hourly weather observation data. *Sol. Energy* 2015, 115, 229–242.

[3]Meek, D.W. Estimation of maximum possible daily global solar radiation. *Agric. For. Meteorol.* 1997, 87, 223–241.

[4]Solar Impulse Project. Available online: <http://www.solarimpulse.com/> (accessed on 20 August 2018).

[5]Larminie, .T. & Lowry, L.2003. *Electric Vehicle Technology Explained*, Jolin 'Wiley & Sons Inc,

[6]Kumar, A.; Asha, G.H. Aquila (The Solar Powered Drone). *IJIEEE* 2016

[7]Scrosati B, Garche J (2010) Lithium batteries : status, prospects and future. *Journal of Power Sources* 195(9):2419-2430. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.11.048>

[8]Rafik BELABED . Etude et dimensionnement d'une installation photovoltaïque .
Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou

[9]Zidan Amar .etude et dimensionnement d'une installation photovoltaïque en niveau d'un
puits de gaz

[10]Khalfaoui Saida Zidani Lydia. Réalisation d'un banc d'essai moteur électrique type
brushless Université Saad Dahleb Blida-1

[11]Course: IE 420 - Technology and R&D Management. INTERNATIONAL UNIVERSITY
OF SARAJEVO. PV Power System Definition & Solution Development Project. Benjamin
DURAKOVIC

[12]B. Sjödaahl, "Autonomous Recharging for Swarms of Flying Robots," 2014

[13]SOLAR-POWERED AUTONOMOUS QUADCOPTER FOR SURVEILLANCE.
FEDERAL UNIVERSITY OF TECHNOLOGY OWERRI (FUTO), CHINONSO HENRY.

[14]Safyanu BD; Abdullah MN; Omar Z (2019) Review of Power Device for Solar-Powered
Aircraft Applications. J Aerosp Technol Manag,

[15]Maxeon solar technologies

ANNEXE

Tableau: Résultats des essais sur les moteurs A2212 1000KV

Hélice		Volts	Amps	Watts	RPM	Vitesse (mph)	Poussée (g)	Poussée (oz)
GWS HD 8x4	1	7	3.35	23	6630	25.1	226	7.97
GWS HD 8x4	1	7.9	4.1	32	7410	28.1	287	10.12
GWS HD 8x4	1	8.9	4.85	43	8220	31.1	347	12.24
GWS HD 8x4	1	9.9	5.65	55	8940	33.9	420	14.82
GWS HD 8x4	1	10.9	6.5	70	9660	36.6	495	17.46
GWS HD 9x5	1	6.9	5.5	37	6000	28.4	348	12.28
GWS HD 9x5	1	7.9	6.7	52	6660	31.5	436	15.38
GWS HD 9x5	1	8.9	7.85	69	7290	34.5	526	18.55
GWS HD 9x5	1	9.9	9.25	91	7920	37.5	627	22.12
GWS HD 10x6	1	7.9	8.7	68	6180	35.1	526	18.55
GWS HD 10x6	1	8.9	10.1	89	6690	38.0	617	21.76
GWS HD 10x6	1	9.9	11.7	115	7200	40.9	722	25.47
GWS HD 10x6	1	10.9	13.25	144	7680	43.6	817	28.82
GWS HD 10x8	1	10.8	18.2	196	6390	48.4	733	25.86

