

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES
Faculté de Technologie
Département d'Electrotechnique

Thèse présentée par :

BRAHAMI MOHAMMED NADJIB

Pour l'obtention du diplôme de :

DOCTORAT en SCIENCES

Filière Electrotechnique

Spécialité : Réseaux Electriques

Intitulé de la thèse :

***REALISATION D'UNE UNITE DE PRODUCTION D'ENERGIE
ELECTRIQUE SOLAIRE POUR SITE ISOLE***

Présenté devant le jury composé de :

Dr SAYAH Houari	Professeur (U.D.L. Sidi Bel-Abbès)	Président
Dr HADJERI Samir	Professeur (U.D.L. Sidi Bel-Abbès)	Rapporteur
Dr MESLEM Youcef	Professeur (Université de Tiaret)	Examineur
Dr SMAILI Atallah	Professeur (Université de Tiaret)	Examineur
Dr ZIDI Sid Ahmed	Professeur (U.D.L. Sidi Bel-Abbès)	Examineur
Dr ALLALI Ahmed	Professeur (USTO MB Oran)	Examineur
Dr GHERBI Fatima Zohra	Professeur (U.D.L Sidi Bel Abbès)	Invitée

Soutenue en /09/2015

Remerciements

La thèse est une période pleine d'enseignements, de découvertes, de remises en question, d'espoirs, de difficultés et de rencontres. C'est toutes ces choses qui font la richesse d'une thèse...

En premier lieu je souhaite remercier mon encadrant, Professeur **Hadjeri Samir** qui m'a fait l'honneur d'accepter de m'encadrer dans ma thèse de doctorat, merci pour tous.

Ensuite je souhaite remercier l'ensemble des membres du jury pour le temps et l'énergie qu'ils ont dédiés à la lecture et à la correction de mon manuscrit.

Je tiens à remercier Professeur **Houari Sayah** d'avoir accepté d'être le président de mon jury ainsi que Professeur **Zidi Sid Ahmed**, Professeur **Meslem Youcef**, Professeur **Smaili Atallah** et Professeur **Allali Ahmed** d'avoir accepté d'être membre de jury de ma thèse.

Je souhaite également remercier Professeur **Gherbi FZ** d'avoir accepté de prendre part à mon jury.

Un grand remerciement au Professeur **Brahmi Mostefa**, merci pour l'aide continue.

Je vais finir mes remerciements par LA FAMILLE, LES AMIS, vous êtes la raison qui fait attendre le soir, le week end et les vacances avec tant d'impatience.

SOMMAIRE

	<u>PAGE</u>
Introduction générale	01
Chapitre I Généralités sur la conversion photovoltaïque	
I-1 Introduction	05
I-2 Energie solaire	05
1-3 Inclinaison de la terre	07
I-4 Inclinaison du module par rapport au soleil	07
I-5 Mouvement du Globe terrestre	07
I-6 Sphère céleste	08
I-7 Coordonnées célestes	09
I-7-1 Coordonnées géographiques	09
I-7-1-1 Longitude.....	09
I-7-1-2 Latitude.....	09
I-8 Temps solaire	09
I-8-1 Temps solaire vrai	09
I-8-2 temps solaire moyen	10
I-8-3 Angle horaire de coucher du soleil	10
I-9 Conversion photovoltaïque	10
I-9-1 Effet photovoltaïque	10
I-9-2 Cellule photovoltaïque	11
I-9-2-1 Principe de fonctionnement d'une cellule PV	11
I-9-2-2 Schéma équivalent d'une cellule solaire	12
I-9-2-3 Constituants d'une cellule photovoltaïque	13
I-9-2-4 Différent types des cellules photovoltaïques	13
I-9-2-5 Caractéristique $I=f(V)$ d'une cellule solaire	14
I-9-2-6 Paramètres caractéristique d'une cellule solaire.....	15
I-9-3 Module photovoltaïque.....	16
I-9-3-1 Caractéristiques d'un module.....	18

I-9-4	Panneau solaire.....	18
I-9-5	Type de système du PV	21
I-9-5-1	Systèmes autonomes	21
I-9-5-2	Systèmes hybrides	22
I-9-5-3	Systèmes photovoltaïques connectés au réseau.....	23
I-10	Système de stockage	23
I-10-1	Principe de fonctionnement d'une batterie.....	23
I-10-2	Caractéristiques principales d'une batterie.....	24
I-10-3	Modélisation de stockage	25
a)	Modèle de la charge de la batterie.....	25
b)	Modèle de la décharge de la batterie.....	26
c)	Tension de la batterie	27
d)	Courant de batterie.....	27
e)	Rendement de la batterie.....	27
I-10-4	Différents types de batterie au plomb.....	28
I-10-4-1	Batterie au plomb ouvert	28
I-10-4-2	Batterie au plomb étanche.....	28
I-10-5	Méthodes de charge des batteries au plomb	28
I-10-6	Entretien des batteries	28
	Conclusion.....	29

Chapitre II Convertisseurs Continu-Continu

II-1	Introduction	30
II-2	Principe de fonctionnement d'un convertisseur DC/DC	30
II-3	Convertisseur dévolteur « BUCK ».....	30
II-3-1	Principe de fonctionnement.....	30
II-3-2	Conduction continue	31
II-3-3	Conduction discontinue.....	33
II-3-4	Limite entre la conduction continue et discontinue	34

II-3-4 Cas du circuit non idéal	36
II-4 Convertisseur survolteur « Boost ».....	37
II-4-1 Principe de fonctionnement.....	37
II-4-2 Conduction continue	38
II-4-3 Conduction discontinue.....	40
II-4-4 Limite entre la conduction continue et discontinue	41
II-5 Convertisseur dévolteur-survolteur « Buck-Boost ».....	43
II-5-1 Mode de fonctionnement	43
II-5-2 Conduction continue	45
II-5-3 Conduction discontinue	46
II-5-4 Limite entre la conduction continue et discontinue	48
II-6 Convertisseur SEPIC.....	50
II-6-1 Mode de fonctionnement.....	50
II-6-2 Phase de conduction	52
II-6-3 État de récupération	53
II-6-4 Dimensionnement du SEPIC	53
II-6-4-1 Calcul du rapport cyclique	53
II-6-4-2 Choix des inductances	53
II-6-4-3 Choix des condensateurs	54
II-6-4-4 Choix du MOSFET	55
II-7 Conclusion	55

Chapitre III Onduleurs monophasés

III-1 Introduction	56
III-2 Origine des convertisseurs de puissance électrique.....	56
III-3 Caractéristiques propres d'un onduleur pour systèmes photovoltaïques.....	57
III-3-1 Principe de la recherche du MPPT.....	57
III-4 Classification	58
III-4-1 Onduleur non autonomes.....	58
III-4-2 Onduleur autonome	59
III-5 Généralités	59
III-5-1 Onduleur en pont à commande symétrique	60
III-5-1-1 Schéma	60
III-5-1-2 Chronogrammes	60
III-5-1-3 Analyse des chronogrammes pour $0 \leq t < T$	61
III-5-2 Onduleur en pont à commande décalée.....	62
III-5-2-1 Analyse des chronogrammes pour $0 \leq t < T$	62

III-5-3 Onduleur en pont à commande MLI	63
III-5-3-1 Analyse globale du chronogramme.....	64
III-5-4 Onduleur de secours pour le matériel informatique.....	64
III-6 Réalisation pratique.....	65
III-6-1 Interrupteurs bidirectionnels	65
III-6-2 Onduleur à quatre interrupteurs.....	66
III-6-2-1 Schéma du montage	66
III-6-2-2 Analyse du fonctionnement.....	67
III-6-2-2-1 Commande symétrique	67
III-6-2-2-2 Commande décalée	69
III-7 Fonctionnement de la maquette.....	70
III-8 Maquette	72
III-8-1 Commande de la maquette.....	73
III-8-1-1 Décomposition du signal	73
III-8-1-2 Régulateur	75
III-8-1-3 PIC 16F84A	75
III-8-2 Etage de puissance	77
III-8-2-1 Interrupteurs commandés	77
III-8-3 Lien entre commande et étage de puissance	78
III-8-3-1 Fonctionnement.....	79
III-9 Conclusion.....	81

Chapitre IV Plan d'expérience pour générateur photovoltaïque

Introduction.....	82
IV.1 Réalisation d'un GPV.....	82
IV.1.1 Partie mécanique.....	82
IV.1.1.1 Description de la structure.....	82
IV.1.1.2 Orientation à l'axe horizontal (élévation).....	83
IV.1.1.3 Orientation à l'axe vertical (azimute)	84
IV.2 Choix du moteur électrique.....	84
IV.2.1 Vérins électriques.....	85
IV.2.2 Schéma cinématique	86
IV.2.3 Présentation	86
IV.2.3.1 Principe de fonctionnement.....	86
IV.2.3.2 Etude mécanique	87
IV.2.3.3 Dessin du support mécanique.....	88
IV.3 Partie électrique.....	88

IV.4 Plans d'expérience appliquée au système solaire photovoltaïque.....	99
IV.5 Logiciel MODDE 5.0.....	104
IV.6 Plans d'expériences « un-facteur-à-la-fois ».....	105
IV.7 CONCLUSION.....	115

Chapitre V Simulation et Réalisation d'un Générateur photovoltaïque

V.1 Introduction.....	116
V.2. Eléments d'une Installation PV.....	117
V.3. Différents types de systèmes photovoltaïques.....	118
V.3.1. Systèmes hybrides individuels.....	118
V.3.2. Systèmes autonomes avec batterie d'accumulateurs.....	118
V.3.3. Systèmes PV raccordés réseau	119
V.3.3.1. Vente totale.....	119
V.3.3.2. Vente du surplus.....	119
V-4. Première centrale photovoltaïque en Algérie.....	120
V-4-2 Présentation du projet.....	120
V.5 Simulation du générateur PV réalisé au laboratoire ICEPS.....	121
V.5.1. Présentation du logiciel.....	122
V.5.1.2 Menus principaux	122
V.5.1.3. Caractéristiques géographiques du site.....	123
V.5.1.4. Simulation de systèmes PV avec le logiciel PVSYST	124
V.5.2 Etape de réalisation du générateur photovoltaïque.....	130
V.5.2.1 Structure métallique motorisée.....	130
V.5.2.2 : Schéma électriques du générateur.....	132
V.5.3 Caractérisation, essais et mesures du générateur PV.....	134
V.6 Conclusion.....	143
Conclusion générale.....	144
Bibliographie	

Introduction générale

Depuis plusieurs décennies, de nouvelles énergies apparaissent telles que l'énergie éolienne ou l'énergie photovoltaïque. Cette dernière, découverte en 1839 par le physicien français Antoine Becquerel, possède un grand potentiel car elle est non polluante et non bruyante.

"Photovoltaïque" vient du grec 'photos' qui signifie lumière et de 'Volta', éminent savant connu pour avoir découvert l'énergie animale et inventé la pile.

Le principe de l'énergie photovoltaïque consiste en la transformation directe de la lumière émise par le soleil en énergie électrique. En plus d'être inépuisable, l'énergie solaire est extraordinairement abondante, puisque l'irradiation que le Soleil fait parvenir sur la Terre chaque année représente plus de 10 000 fois la consommation mondiale actuelle d'énergie primaire, toutes formes et tous usages confondus.

Par rapport à d'autres sources d'énergie, l'énergie solaire est une bonne option car elle est disponible pendant les périodes de pointe énergétique, à la différence du vent qui produit souvent plus d'énergie la nuit que le jour. La nuit, la demande d'énergie est deux fois moins importante que le jour. Dans le passé, le coût de l'énergie solaire était d'environ trois fois le coût de l'électricité issue de sources conventionnelles, ce qui a nui à son développement. La hausse des coûts de l'électricité et le problème du réchauffement climatique ont fait que toutes les autres sources d'énergie sont en train d'être examinées de plus près.

L'énergie solaire est disponible en plus ou moins grande quantité en tout point du globe terrestre, mais de façon variable au cours du temps, suivant les heures de la journée et suivant les saisons.

L'électricité d'origine solaire photovoltaïque, même si elle ne représente à ce jour qu'une part négligeable du paysage énergétique global, seulement 0,02 % de l'électricité produite en 2004, est appelée à connaître un important essor qui devrait en faire l'une des sources majeures dans un bouquet énergétique nouveau au milieu du XXI^e siècle. Elle a fortement contribué au développement des systèmes spatiaux depuis 50 ans et joue un rôle déterminant dans les télécommunications et les télémesures. Elle connaît maintenant une croissance supérieure à 30 % par an dans les applications terrestres, maintenue et confirmée depuis plusieurs années sous l'effet des mesures volontaristes récentes s'inscrivant dans une démarche de développement durable.

Introduction générale

Les cellules solaires photovoltaïques, expérimentées depuis longtemps dans les laboratoires, n'ont connu un véritable essor qu'avec l'apparition des satellites et la nécessité de trouver une source d'énergie autonome.

Ce marché aérospatial a permis le développement de ces dispositifs, mais ne semble pas avoir favorisé une baisse des prix de revient dans l'optique d'applications au domaine conventionnel de l'électricité.

Ce n'est que depuis quelques années, à la suite de l'amélioration des rendements de conversion, que ce domaine d'applications fut envisageable.

Dès lors, la demande croissante, liée à une crise énergétique, a produit un effet favorable sur l'évolution de la technologie et du prix de revient des cellules. Dans les années à venir, un coût de 1 dollar/W semble devoir être atteint et ceci rendra possible l'utilisation commerciale des dispositifs photovoltaïques.

De nos jours, les générateurs solaires sont généralement installés dans des lieux isolés où l'approvisionnement en énergie : ligne électrique ou transport de carburant, est malaisé, onéreux, voire impossible. Ces générateurs constituent alors des sources d'énergie rentables et fiables.

Parmi les applications les plus courantes, on peut citer :

- le pompage de l'eau destinée à l'irrigation par exemple,
- les télécommunications : relais hertziens, poste d'appel de secours d'autoroute et télévision, radiotéléphone, émetteur-récepteur de radio...,
- la télémétrie : enregistrement et transmission de données météorologiques, hydrauliques, sismiques..., contrôle d'oléoducs,
- l'aide à la navigation aérienne ou marine : balises d'aéroport, bouées, plateformes en mer,...
- les utilisations militaires : appareillage portatif de radio, surveillance,...
- les utilisations domestiques : éclairage, climatisation, réfrigération.

Pratiquement, l'utilisation de cette énergie ne peut se faire directement que de manière intermittente et irrégulière : certaines applications, comme le pompage par exemple, peuvent s'accommoder en général d'un tel mode d'alimentation, mais beaucoup d'autres, dans les domaines les plus divers, demandent une alimentation régulière sinon constante, y compris pendant les périodes peu ou non ensoleillées : l'éclairage est à cet égard un exemple typique.

De telles conditions de fonctionnement requièrent de prévoir un élément de stockage de l'énergie. Le dimensionnement de cet élément, comme d'ailleurs le dimensionnement des divers autres organes de puissance du système, dépend en grande partie des cycles respectifs

Introduction générale

d'ensoleillement et de consommation de l'énergie, de la durée d'autonomie désirée, de la sûreté de fonctionnement recherchée.

La production de l'énergie est un grand défi pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution, l'épuisement rapide et l'instabilité des prix des fossiles à l'échelle mondiale ont nécessité une recherche urgente pour de nouvelles sources d'énergie pour répondre aux exigences actuelles.

Pour subvenir aux besoins en énergie de la société actuelle, il est nécessaire de trouver des solutions adaptées et de les diversifier. Actuellement, il y a principalement deux façons possibles d'agir.

La première est de diminuer la consommation des récepteurs d'énergie et augmenter la productivité des centrales énergétiques en améliorant leur efficacité.

Une deuxième méthode consiste à développer de nouvelles sources d'énergie. Des recherches sont en cours dans le domaine de la fusion nucléaire qui, éventuellement, pourrait être une solution énergétique du futur, mais l'avenir de cette filière et encore moins son avènement ne sont pas assurés.

Dans l'immédiat, nous disposons de ressources en énergie renouvelable inépuisables que nous sommes en mesure d'exploiter de plus en plus facilement et proprement. Les techniques d'extraction de la puissance de ces ressources demandent des recherches et des développements plus approfondis visant à fiabiliser, abaisser les coûts (de fabrication, d'usage et de recyclage) et augmenter l'efficacité énergétique.

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre travail : la réalisation d'un générateur solaire pour site isolé.

Introduction générale

Depuis quelques décennies, les panneaux solaires photovoltaïques ont un grand succès chez les particuliers et ils peuvent facilement être installés.

Des programmes de recherche et développement en énergie solaire sont créés dans l'industrie, les universités et les laboratoires. Dans une industrie solaire en plein essor, les progrès de la technologie ne peuvent être que l'accroissement de l'efficacité qui réduira le coût de l'énergie solaire et permettra sa plus grande expansion. Les objectifs qui doivent être remplis dans cette sont:

- Étudier le fonctionnement de la cellule photovoltaïque et le convertisseur DC-DC dans la production et la conversion de l'énergie électrique.
- Analyser et concevoir un système d'énergie solaire photovoltaïque autonome
- Étudier expérimentalement ce système générateur photovoltaïque et valider la simulation à l'aide des mesures expérimentales.

Pour cela nous avons jugé utile de subdiviser notre travail comme suit :

Après une introduction générale on présente des généralités sur la conversion photovoltaïque.

Au deuxième chapitre on présente les différents types de convertisseurs continu-continu permettant de réguler, abaisser ou élever la tension délivrée par le générateur photovoltaïque. On discutera également de la recherche du maximum de puissance en présentant un exemple de régulateur réalisé au laboratoire ICEPS.

Les différents types d'onduleurs ainsi que leur commande (symétrique, décalée et MII), sont présentés au chapitre trois. Des onduleurs monophasés réalisés au laboratoire seront présentés également.

Au chapitre quatre on présentera la théorie du plan d'expérience et son application dans les systèmes photovoltaïques. Cette technique nous permet de réaliser un minimum d'expérience pour valider nos résultats.

La réalisation d'un générateur photovoltaïque de 340 Watts ainsi que son armoire de puissance et commande sera présentée au chapitre cinq. On présentera également les résultats d'essais et mesures du générateur.

Chapitre I Généralités sur la conversion photovoltaïque

1-1 Introduction :

La méthode la plus simple pour la production d'énergie solaire est celle de la conversion photovoltaïque, qui consiste à transformer l'énergie solaire en énergie électrique au moyen de capteurs solaires. Ces cellules sont élaborées sur base de silicium pur avec addition d'impuretés de certains éléments chimiques, ils sont capables de produire chacun de 2 à 4 Ampères, à un voltage de 0.46 à 0.48 V, utilisant le rayonnement solaire comme source d'énergie. Ces cellules ont la particularité de pouvoir transformer autant le rayonnement solaire directe que diffus ce qui permet leurs utilisation les jours nuageux. Les cellules sont montées en série sur les panneaux ou les modules solaires pour obtenir un voltage adéquat aux applications électriques; les panneaux recueillent l'énergie solaire en la transformant directement en énergie électrique sous forme de courant continu, qu'il sera nécessaire de stocker dans des accumulateurs, si l'on souhaite, pouvoir l'utiliser la nuit.

1-2 Energie solaire :

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet (0,2 micron) à l'infrarouge lointain (2,5 microns), avec une majorité dans le visible (0,3 micron –violet– à 0,8 micron–rouge–) autour d'un pic à 0,45 micron. L'énergie totale portée par ce rayonnement est de près de 1 360 W/m² dans l'espace, au voisinage de la Terre, et de 1 000 W/m² au niveau de la Terre, du fait de l'absorption dans l'atmosphère.

Albert Einstein a découvert en travaillant sur l'effet photoélectrique que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire mais que son énergie était portée par des particules, les photons, l'énergie d'un photon étant donnée par la relation :

$$E = hc / \lambda \quad (1-1)$$

Où h est la constante de Max Planck (1858-1947), c la vitesse de la lumière et λ la longueur d'onde.

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande. Cette découverte valut à Albert Einstein (1879-1955) le prix Nobel en 1905.

Une façon commode d'exprimer cette énergie est justement son analogue électrique :

$$E = 1,26 / \lambda \quad (1-2)$$

Où si λ est exprimé en micron, E s'exprime alors en électronvolt (noté eV) : 1eV est donc l'énergie d'un électron sous un potentiel d'un volt.

Le rayonnement du soleil parvenant à la surface de la terre se compose de l'infrarouge qui procure de la chaleur, le visible qui est nécessaire à la croissance des plantes et des animaux, l'ultraviolet qui brunit la peau et tue les bactéries. Le spectre du soleil s'étend de 200 nm à 3000 nm tel que montré à la figure 1-1.

Les photopiles se différencient par leur sensibilité spectrale, ou capacité à convertir certaines longueurs d'onde. [06]

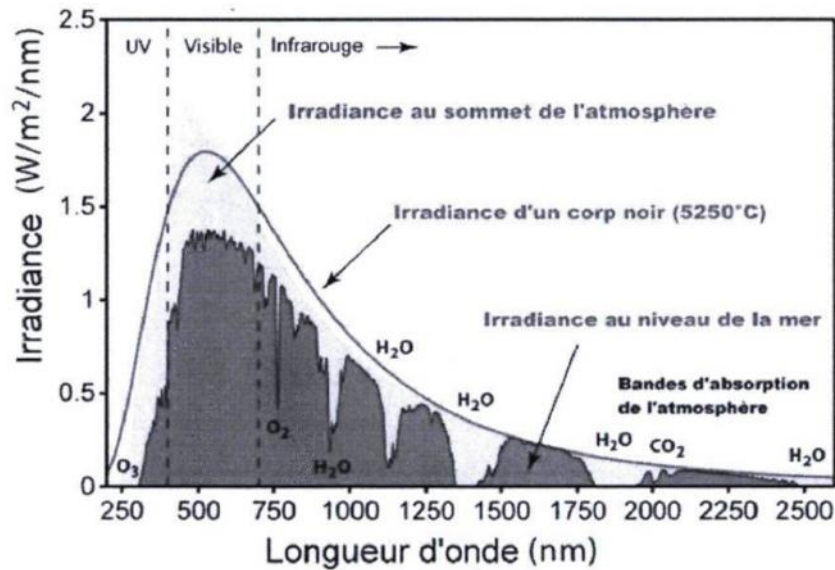


Figure 1-1 : Spectre d'irradiance solaire.

La valeur retenue pour la constante solaire est : $I_0 = 1360 \text{ W/m}^2$. Cette valeur est variable pendant l'année puisque la distance terre-soleil est elle-même variable (résultat de la trajectoire elliptique). La correction terre soleil est donnée par:

$$C_{I-S} = 1 + 0.0034 \cos(360/365(j-2)) \quad (1-3)$$

Où j : Angle entre le soleil et le plan horizontal du lieu. La constante solaire corrigée est:

$$I = I_0 * C_{I-S} \quad (1-4)$$

1-3 Inclinaison de la terre :

L'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan équatorial est donné par :

$$d = \arcsin \left[0.389 \sin \left[\left(\frac{360}{365} \right) \times (N - 82) + 2 \sin \left(\left(\frac{360}{365} \right) \times (N - 2) \right) \right] \right] \quad (1-5)$$

Où N est le nombre de jours de l'année à partir du premier janvier.

1-4 Inclinaison du module par rapport au soleil :

Les panneaux solaires doivent être placés perpendiculairement au soleil pour obtenir un résultat optimal.

Pour récupérer un maximum de rayonnement solaire, on doit ajuster à la fois l'orientation et l'inclinaison du panneau solaire.

L'orientation indique vers quel point cardinal un panneau est exposé : face au sud, au nord, à l'est, ou à l'ouest.

L'inclinaison est l'angle que fait le panneau avec le plan horizontal.

L'ajustement sur le plan horizontal (azimut) s'obtient en pointant les panneaux solaires : vers le sud lorsqu'on est dans l'hémisphère nord, vers le nord lorsqu'on est dans l'hémisphère sud. L'ajustement sur le plan vertical nécessite de connaître la trajectoire du soleil, en fonction de la saison et du lieu géographique.

1-5 Mouvement du Globe terrestre :

La terre décrit autour du soleil une orbite elliptique quasi circulaire avec une période de 365,25 jours. Le plan de cette orbite est appelé plan de *l'écliptique*. C'est au solstice d'hiver (21 décembre) que la terre est la plus proche du soleil, et au solstice d'été (22 juin) qu'elle en est la plus éloignée. La terre tourne sur elle-même avec une période de 24h. Son axe de rotation (l'axe des pôles) a une orientation fixe dans l'espace. Il fait un angle $d = 23^\circ 27'$ avec la normale au plan de l'écliptique.

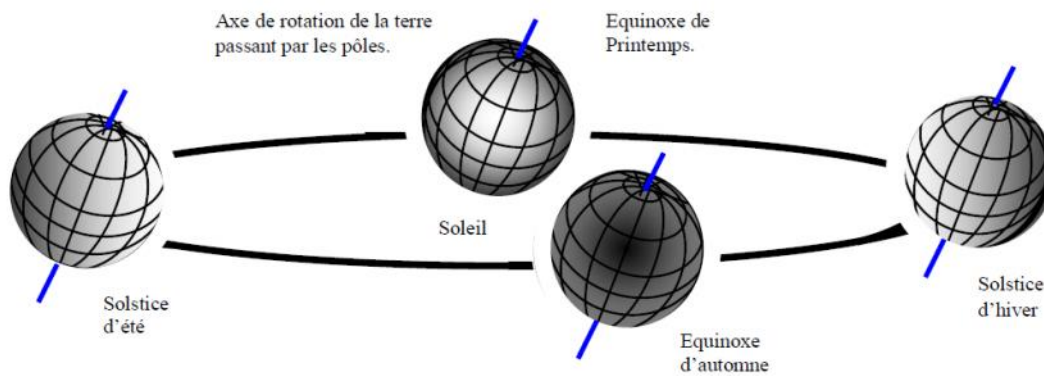


Figure 1-2 : Variation saisonnière du rayonnement solaire

1-6 Sphère céleste :

La sphère céleste est une sphère imaginaire d'un diamètre immense, avec la terre au centre. On considère que tous les objets visibles dans le ciel se trouvent sur la surface de la sphère céleste. On peut résumer les différentes caractéristiques sur la sphère elle-même comme est représenté sur la figure (I-3)

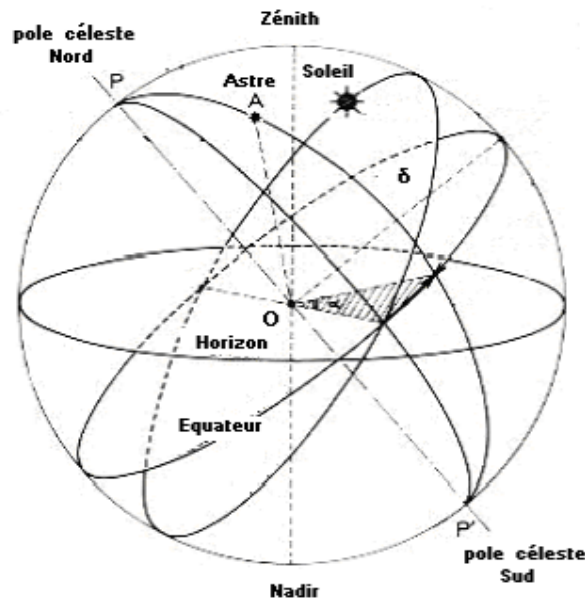


Figure 1-3 : Sphère céleste

La direction des objets peut être quantifiée de façon précise à l'aide d'un système de coordonnées célestes.

1-7 Coordonnées célestes :

1-7-1 Coordonnées géographiques

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la terre

1-7-1-1 Longitude

La longitude d'un lieu l correspond à l'angle que fait le plan méridien passant par ce lieu avec un plan méridien retenu comme origine. On a choisi pour méridien (origine 0°) le plan passant par l'observatoire de Greenwich. Par convention on affecte du signe (+) les méridiens situés à l'est de ce méridien, et du signe (-) les méridiens situés à l'ouest) Exemple : Sidi Bel Abbes = $-0,64^\circ$

1-7-1-2 Latitude

La latitude d'un lieu f correspond à l'angle avec le plan équatorial, que fait le rayon joignant le centre de la terre à ce lieu. L'équateur terrestre est donc caractérisé par une latitude égale à 0, le pôle nord par la latitude $+90$ et le pôle sud par la latitude -90 . Cette convention de signe affecte le signe (+) à tous les lieux de l'hémisphère nord et le signe (-) à tous les lieux de l'hémisphère sud. Exemple : Sidi Bel Abbes = $35,19^\circ$

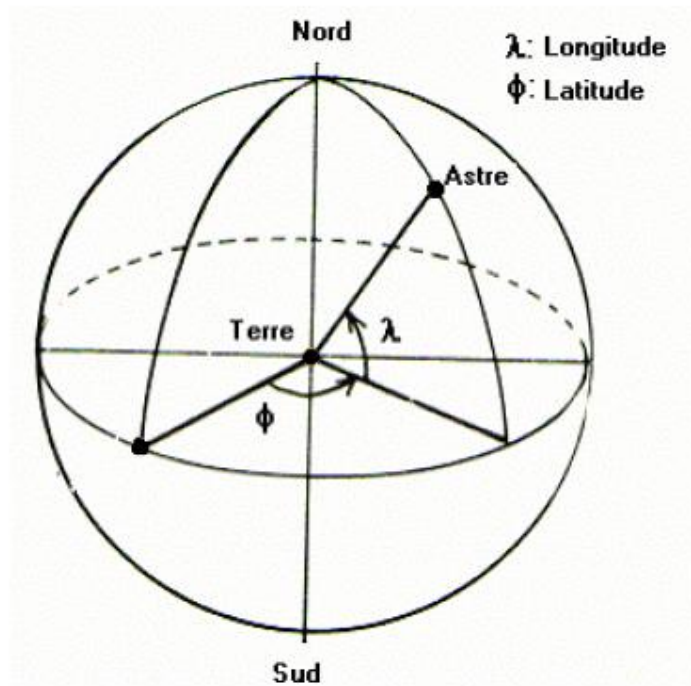


Figure 1-4 : Coordonnées horaires

1-8 Temps solaires :**1-8-1 Temps solaire vrai :**

On appelle « temps solaire vrai » (en abrégé TSV) en un lieu et à instant donné, l'angle horaire du soleil en ce lieu et à cet instant. C'est une notion qui traduit à la fois le mouvement de rotation de la terre sur elle même et son mouvement autour du soleil. Son introduction est naturelle, car il est lié à l'alternance des jours et des nuits. C'est le TSV qui est indiqué sur les quadrants solaires.

Remarque importante :

La définition de TSV donnée ci dessus est la définition en astronomie. En physique, on prend, par commodité, $TSV=12$ h pour la valeur nulle de l'angle horaire (c'est à dire midi), c'est cette dernière définition que nous utiliserons par la suite. $TSV=12+ (w/15)$ en heures.

1-8-2 temps solaire moyen :

La vitesse de la Terre sur son orbite n'est pas constante au cours de l'année. Pour avoir un temps qui " s'écoule " à vitesse constante (celui mesuré par les horloges), on définit donc un temps solaire moyen.

Historiquement, la journée solaire moyenne a été utilisée pour définir les unités de temps. On a encore avec une bonne précision 1 jour = 24h 00m 00s.

L'écart entre TSV et TSM varie selon la date, mais est nul en moyenne, par définition. L'expression de cet écart porte le nom de " Equation du temps ".

1-8-3 Angle horaire de coucher du soleil :

L'angle horaire du soleil est le déplacement angulaire du soleil autour de l'axe polaire.

Dans sa course d'est en ouest, par rapport au méridien local. Il est donné par l'équation suivante :

$$w_s = ar \cos(- \tan(\phi) \tan(\delta)) \quad (1-6)$$

δ : Déclinaison solaire

ϕ : latitude

1-9 Conversion photovoltaïque :**1-9-1 Effet photovoltaïque :**

L'effet photovoltaïque est la production de l'énergie électrique par un système recevant du flux lumineux. Il repose sur le principe suivant :

On dope un disque de silicium positivement. Une de ces faces est ensuite dopée N, une jonction PN est ainsi réalisée. Du coté P comme du coté N, nous avons des trous et des

électrons fixes. Ces charges fixes donnent naissance à un champ électrique E qui tend à repousser les charges mobiles de part et d'autre de la zone de transition. Aucun courant ne traverse la jonction. Lorsque la cellule solaire est éclairée, une partie des photons qui la frappent est réfléchiée et l'autre partie pénètre dans la jonction. Les photons absorbés possédant une énergie suffisante, libèrent des paires électrons – trous qui à leurs tours se déplacent sous l'action du champ électrique dans le cristal par phénomène de diffusion, ce qui provoque une différence de potentiel à ces bornes. [02]

Le branchement d'une charge à ces bornes, permet l'écoulement d'un courant, l'énergie des photons est ainsi convertie en énergie électrique.

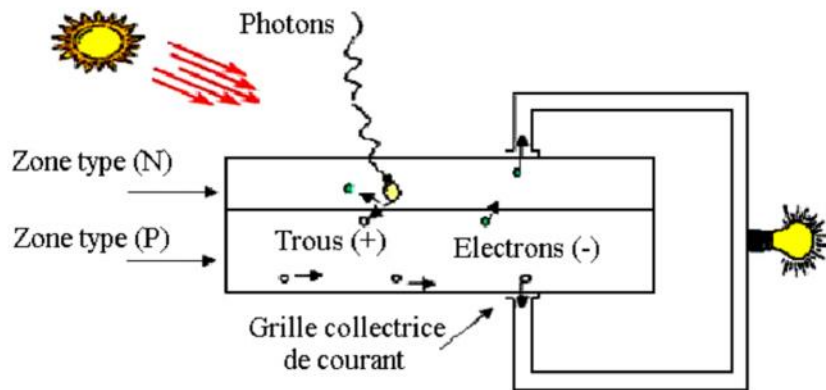


Figure 1-5 : Schéma descriptif d'une cellule photovoltaïque (vue de face)

1-9-2 Cellule photovoltaïque :

1-9-2-1 Principe de fonctionnement d'une cellule PV :

Dans une cellule solaire photovoltaïque la lumière est convertie directement en électricité. Une cellule solaire est composée d'une couche mince de matériau semi conducteur dans laquelle des charges électriques sont provoquées par l'incidence de lumière. La création dans le semi conducteur d'un champ électrique interne permet de séparer des charges positives et négative. Lorsque une charge est appliquée entre la face supérieure négative et la face inférieure de la cellule solaire, du courant continu sera généré. [03]

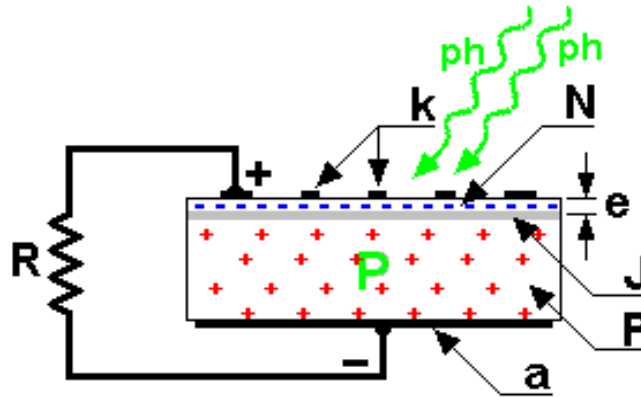


Figure 1-6 : Fonctionnement de la cellule solaire

1-9-2-2 Schéma équivalent d'une cellule solaire :

Lorsqu'on branche aux bornes de la cellule solaire une charge, il apparaît une tension V et un courant I . La relation entre ces deux grandeurs est donnée par l'équation suivante :

$$I = I_{PH} - I_0 \left(\exp \left(\frac{q(V_D + R_S I)}{A k T} \right) - 1 \right) - \frac{V_D + R_S I}{R_{SH}} \quad (1-7)$$

Avec :

I_{PH} : Photocourant généré.

I_0 : Courant de saturation.

q : Charge de l'électron ($1,6 \cdot 10^{-19}$ coulomb).

K : Constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-38}$ J/K).

T : Température de la jonction en degrés kelvin.

R_S, R_{SH} : Résistance série et parallèle de la cellule solaire.

V_D : Tension au niveau de la diode.

A : Correspondant au facteur d'idéalité, il représente la déviation des caractéristiques par rapport à une diode idéale.

I, V : Grandeurs de sortie de la cellule solaire.

De là, on peut illustrer une cellule solaire en fonctionnement par le schéma équivalent suivant : [04]

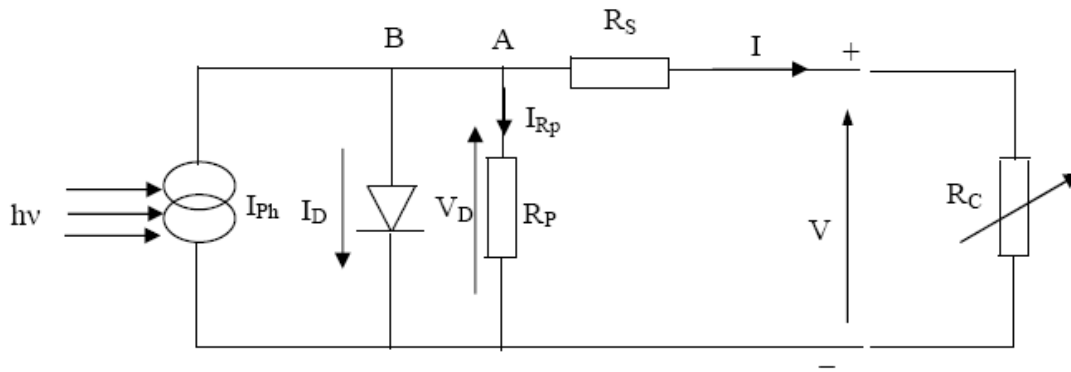


Figure 1-7 : Schéma équivalent d'une cellule solaire réelle

1-9-2-3 Constituants d'une cellule photovoltaïque : [05]

La cellule est constituée de plusieurs couches :

- ✓ une couche de protection translucide.
- ✓ une couche conductrice (k) qui sert de cathode (pôle+) (grille métallique).
- ✓ une couche avec porteurs de charge libre négative (N).
- ✓ une jonction entre (N) et (P) (i).
- ✓ une couche avec porteurs de charge libres positive (P) (cristal semi-conducteur), une couche de contact conductrice en métal (a) qui joue le rôle de l'anode (p).
- ✓ une couverture pour la protection contre les influences externes qui sont indispensable car la cellule photovoltaïque est très fragile.

1-9-2-4 Différent types des cellules photovoltaïques :

1. Les cellules monocristallines : Elles sont constituées d'un cristal à deux couches, le plus souvent du silicium, elles ont un rendement entre 15 et 22% mais elles sont chères à fabriquer.
2. Les cellules poly-cristallines : Elles sont constituées de plusieurs cristaux, ce qui diminue leur prix de fabrication. Cependant leur rendement n'est que de 10% à 13%.
3. Les cellules amorphes : Elles ont un rendement très faible (5 à 10%) mais leur prix est très bas. [05]

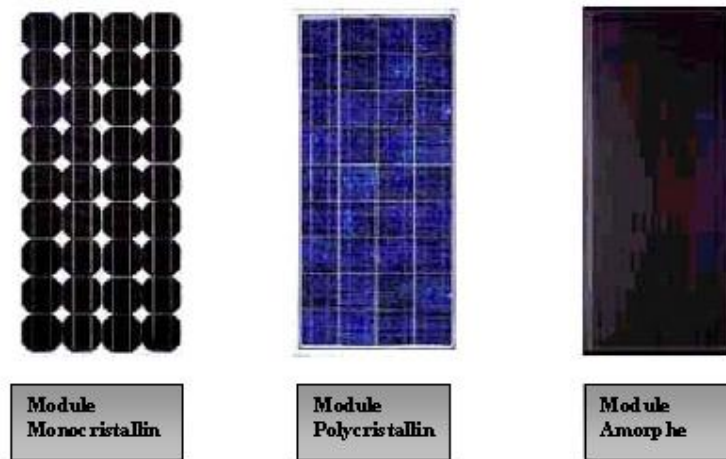


Figure 1-8 : Cellules photovoltaïques

1-9-2-5 Caractéristique $I=f(V)$ d'une cellule solaire :

La caractéristique $I=f(V)$ représente la courbe de puissance, sachant que le courant généré est donné par la formule (1-7) et que la cellule fonctionne sous un éclairement fixe Φ et une température constante T . Le fonctionnement du module est caractérisé essentiellement par trois zones : [06] [05]

Zone MN : le courant I est donné presque constant la cellule se comporte comme un générateur de courant (pratiquement constant de valeur voisine de I_{CC}). Le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances faibles, des courants élevés et des tensions petites.

Zone PS : région correspondant aux valeurs élevées de R_c . La cellule se comporte comme un générateur de tension en circuit ouvert V_{CO} . Le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances faibles, des courants petits et des tensions élevées.

Zone NP : le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances élevées, des courants et des tensions acceptables.

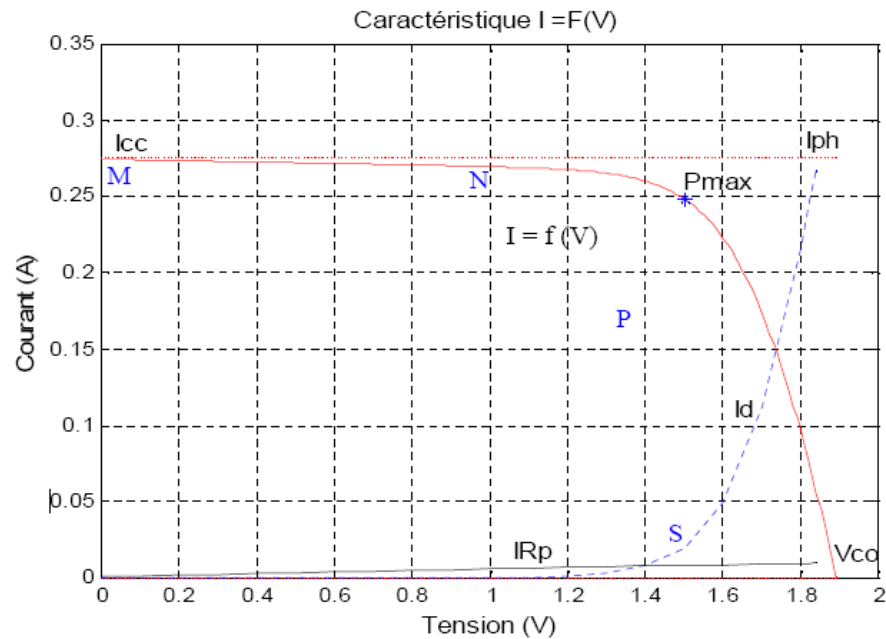


Figure 1-9 : Caractéristique d'une cellule solaire

1-9-2-6 Paramètres caractéristique d'une cellule solaire :

Ces paramètres sont caractérisés par ceux des modules constituant le champ PV : [07] [08] [09]

• Courant de court circuit I_{CC} :

Il est obtenu pour une tension de sortie nulle à partir de l'équation (1-7) :

$$I_{CC} = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{qR_s I_{CC}}{kT}} - 1 \right] - \frac{R_s I_{CC}}{R_p} \quad (1-8)$$

Dans le cas d'une cellule idéale ($R_s = 0$ et $R_p = \infty$)

$$I_{CC} = I_{ph} = qg(L_n + L_p) \quad (1-9)$$

Tenant compte de l'effet des résistances R_s et R_p ; le courant de court circuit varie en fonction de ces deux résistances et est proportionnel au flux incident.

• Tension en circuit ouvert :

Elle est obtenue pour un courant de sortie nul à partir de l'équation (1-8) :

$$0 = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{qV_{CO}}{kT}} - 1 \right] - \frac{V_{CO}}{R_p} \quad (1-10)$$

Dans le cas d'une cellule idéale ($R_s \rightarrow 0$, $R_p \rightarrow \infty$, $I_{CC} = I_{ph}$ et $A=1$)

$$V_{co} = \frac{nKT}{q} \log \left[1 + \frac{I_{cc}}{I_0} \right] \quad (1-11)$$

V_{co} Augmente quand I_0 diminue, elle ne dépend que de la nature du cristal et de la jonction.

▪ **Facteur de forme FF :**

C'est le rapport entre la puissance maximale que peut fournir une cellule et la puissance qu'il est théoriquement possible d'obtenir (puissance optimale) :

$$FF = \frac{P_{max}}{P_{opt}} = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad (1-12)$$

Il caractérise l'influence mixte des résistances série et parallèle sur la caractéristique $I = f(V)$

▪ **Rendement énergétique maximum η_m :**

Le rendement énergétique maximum est le rapport de la puissance maximale fournie (P_{max}) sur la puissance du rayonnement solaire incident (P_i) :

$$\eta_m = \frac{P_{max}}{P_i} = \frac{I_m \cdot V_m}{\phi \cdot S} \quad (1-13)$$

S : surface de la cellule solaire.

ϕ : Flux incident

(I_m, V_m) : Coordonnées du point de fonctionnement.

1-9-3 Module photovoltaïque :

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module figure (I-10-a). Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthylène-vinyl- acétate) figure (I-10-b) et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière d'une ou de polyéthylène [10].

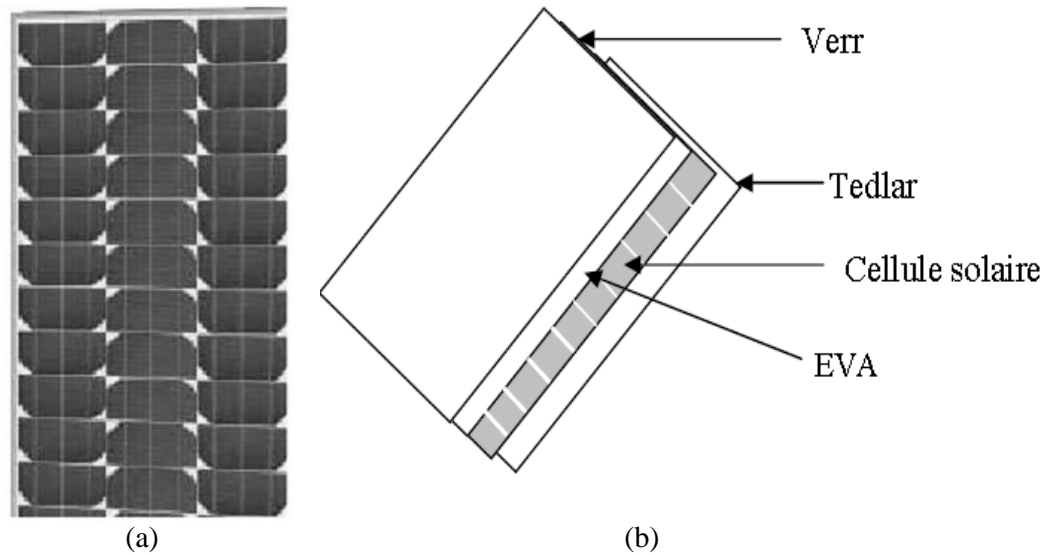


Figure 1-10 : Module photovoltaïque

Les modules sont généralement entourés d'un cadre rigide en aluminium anodisé comprenant des trous de fixation.

A l'arrière de chaque module se trouve une boîte de jonction contenant 2 diodes antiparallèles figure (1-11). Ces diodes antiparallèles permettent d'éviter qu'un module au soleil ne se décharge dans un module à l'ombre [11].

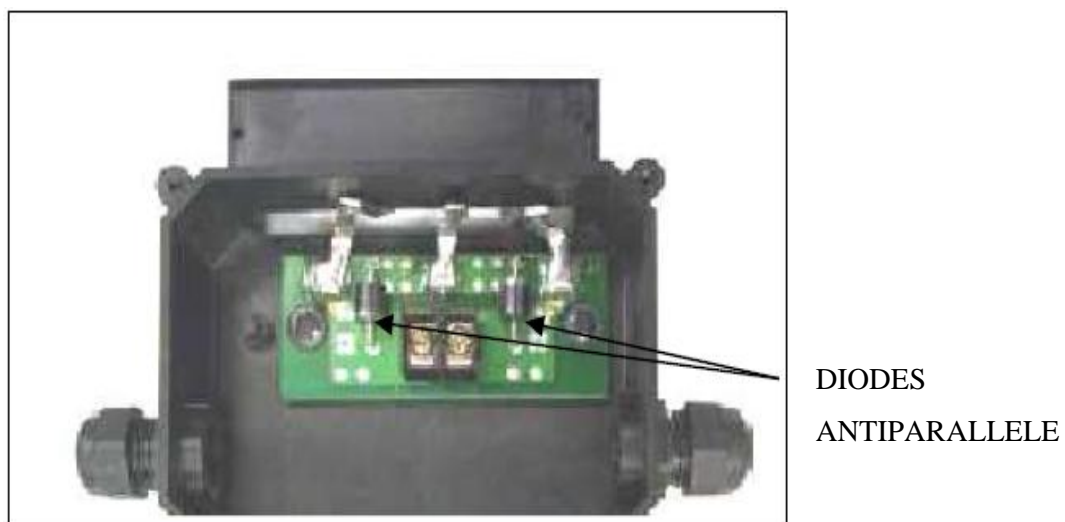


Figure 1-11 : Boîte de jonction [11]

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

- Protection des cellules contre les agents atmosphériques

- Protection mécanique et support.
- Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur.

1-9-3-1 Caractéristiques d'un module [12] :

La puissance de crête, P_c : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m²).

La caractéristique I/V : Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.

Tension à vide, V_{co} : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil ".

Courant de court-circuit, I_{cc} : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil ".

Point de fonctionnement optimum, (U_m, I_m) : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil, $P_m = U_m * I_m$

Rendement : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.

Facteur de forme : Rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance maximale que peut avoir la cellule : $V_{co} * I_{cc}$.

1-9-4 Panneau solaire :

Le panneau solaire ou (champ solaire) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique.



Figure 1-12 : Module photovoltaïque

Pour chaque panneau on peut avoir autant de sorties que de modules, ce que fait qu'on aura besoin de boîte de dérivation qui regroupe le tous, comme l'illustre la figure (1-10),

Alors cette boîte de dérivation fixée sur une structure du montage a comme rôle d'effectuer les connections entre les modules pour obtenir une puissance optimale en sortie.



Figure 1-13 : Boîte de dérivation [12]

La boîte de dérivation est composée également d'un circuit imprimé sur le quel se trouvent :

- Des diodes Schottky série, placée sur un radiateur, sur chaque entrée, qui empêchent aux batteries de se décharger dans les panneaux.
- Des fusibles de protections qui empêcheront aux batteries de se décharger dans les modules en cas de destruction des diodes antiparallèles.
- Des diodes lumineuses, en parallèle sur chaque fusible de protection. Ces diodes permettant de contrôler individuellement chaque branche de modules. Par exemple une boîte à 4 entrées de 24 Volts sera constituée de deux branches de deux modules, il y aura donc deux diodes qui permettront de constater le fonctionnement de chaque branche.
- Une protection parafoudre (Transil ou VDR) en sortie de la boîte.

Le câblage de ces boîtes permet d'avoir une sortie en 12,24 ou 48 volts selon les modules, elles sont équipées de deux à douze entrées, selon les tensions de sortie.

La quantité d'électricité dans l'ensemble des composants des panneaux PV dépend :

- des besoins en électricité.

- la taille du panneau.
- L'ensoleillement du lieu d'utilisation.
- La saison d'utilisation.

La puissance délivrée par un panneau est importante dans les heures d'ensoleillement maximal, ce qui nécessite un élément de stockage.

1-9-5 Type de système du PV :

Les systèmes PV sont de trois types : autonomes, hybrides et reliés au réseau : [13]

1-9-5-1 Systèmes autonomes :

C'est un système photovoltaïque complètement indépendant d'autre source d'énergie et qui alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique.

Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries pour stocker l'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons en site isolé, sur des îles, en montagne ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau.

En règle générale, les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie électrique la plus économique.

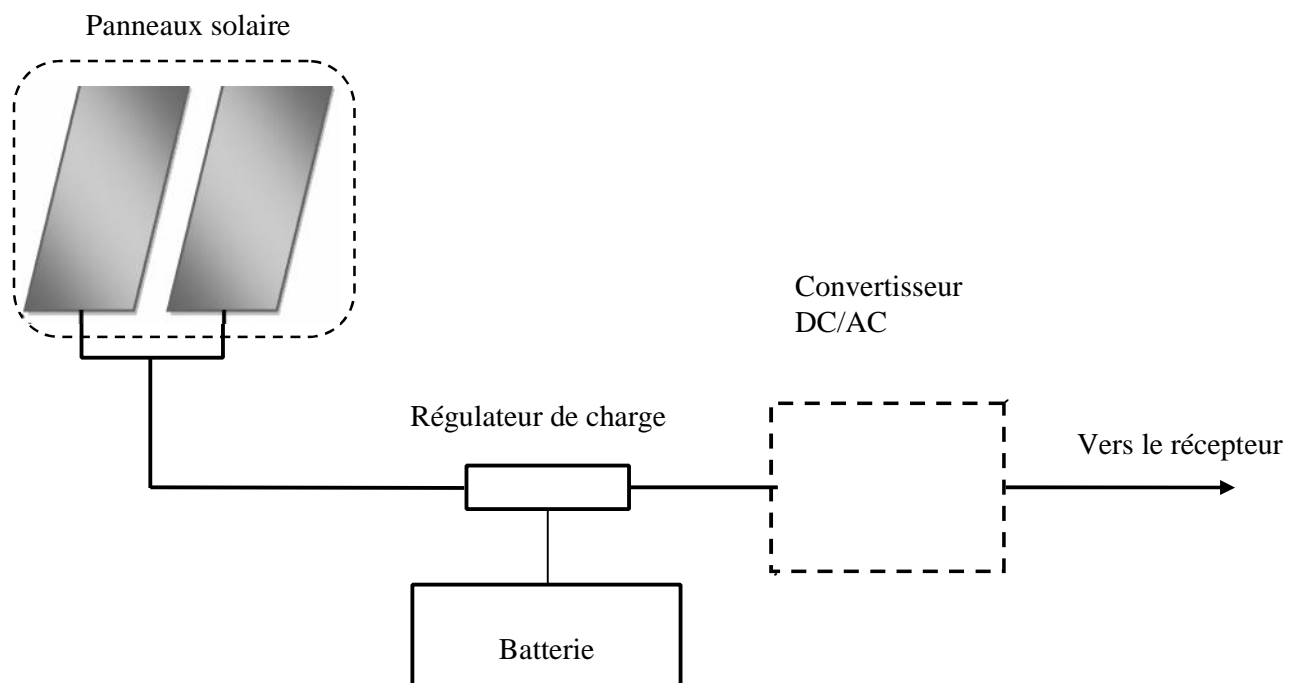


Figure 1-14 : Système photovoltaïque avec stockage

1-9-5-2 Systèmes hybrides :

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou plusieurs sources supplémentaires, qui sont également indépendants des réseaux de distribution d'électricité. En pratique le générateur photovoltaïque est combiné à une éolienne ou à un groupe électrogène à combustible, ou aux deux à la fois avec des accumulateurs de stockage de l'énergie. Un tel système s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée.

Un système hybride photovoltaïque optimise l'utilisation combinée de plusieurs sources d'énergies renouvelables et, ou fossiles et des moyens de stockage associés.

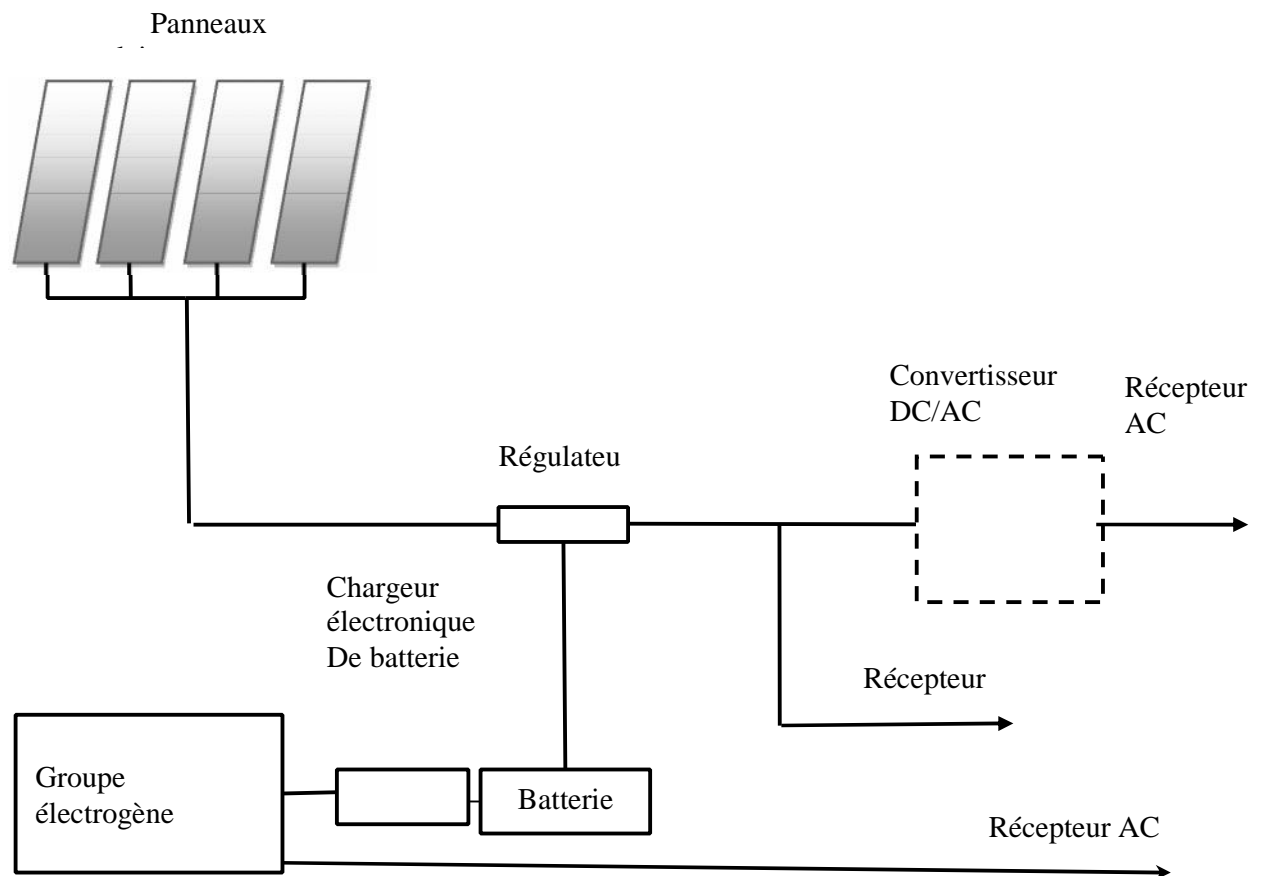


Figure 1-15 : Système d'alimentation autonome hybride photovoltaïque /groupe électrogène

1-9-5-3 Systèmes photovoltaïques connectés au réseau

Un système connecté à un réseau produit sa propre électricité et achemine son excédent d'énergie vers le réseau.

Un tel système n'a pas besoin de stockage d'énergie et élimine donc le maillon le plus problématique (et le plus cher) d'une installation autonome. Dans ce cas l'énergie captée est simplement convertie en courant alternatif et injectée dans le réseau. [02]

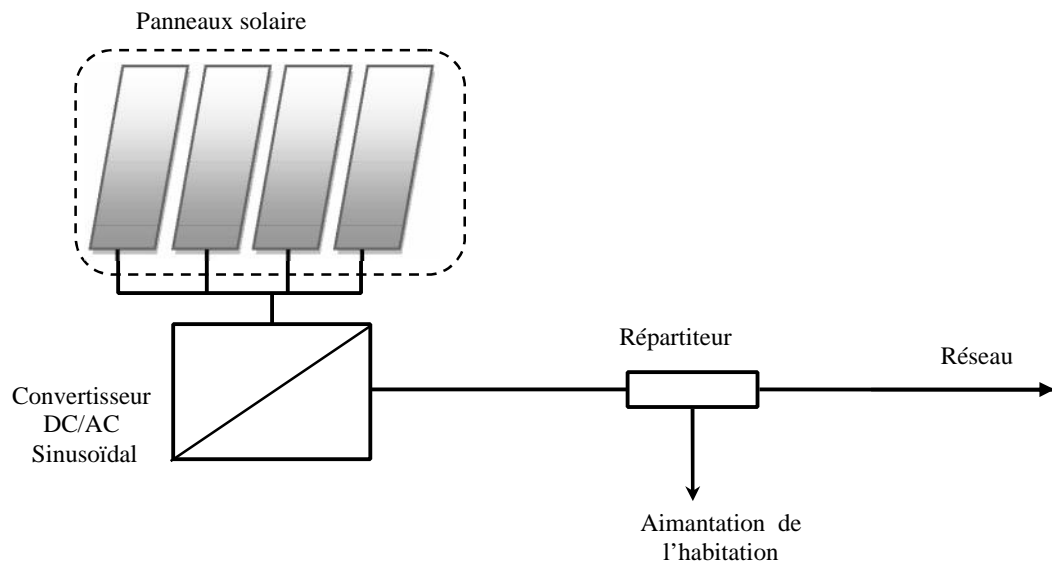


Figure 1-16 : Système photovoltaïque raccordé au réseau

1-10 Système de stockage :

1-10-1 Principe de fonctionnement d'une batterie:

La batterie est un dispositif qui fournit (restitue) de l'énergie électrique après avoir été stockée sous forme d'énergie chimique, ce sont des générateurs électrochimiques.

Elles sont constituées de deux électrodes, plaques positif (anodes) et plaques négatif (cathode) immergées dans un électrolyte. [14]

L'anode est réducteur qui sera oxydée pour générer des électrons et la cathode est oxydant qui sera réduit en captant des électrons, l'électrolyte a pour rôle d'assurer le bon déplacement des ions (électrons). Donc c'est l'accumulation et la restitution dues à la réaction d'oxydoréduction (redox), qui gère le transfert d'ions entre les électrodes.

Dans une batterie, l'accumulation est désignée par la charge et la restitution d'énergie par la décharge.

Dans le cas des batteries au plomb le dioxyde de plomb (PbO_2) est utilisé comme matière active dans l'électrode positive et le plomb (Pb) pour l'électrode négative comme l'indique la (Figure 1-17).

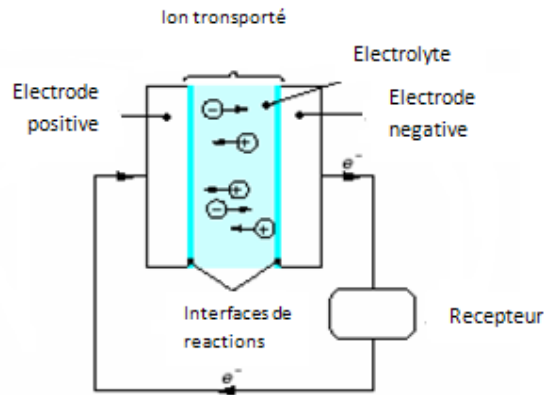


Figure 1-17 : Principe de fonctionnement d'une batterie

1-10-2 Caractéristiques principales d'une batterie :

Capacité en Ampère heure : Les Ampères heure d'une batterie sont simplement le nombre d'Ampères qu'elle fournit multiplié par le nombre d'heures pendant lesquelles circule ce courant. Pour une énergie plus élevée, il est possible d'associer plusieurs batteries, soit en série, soit en parallèle.

Théoriquement, par exemple, une batterie de 200 Ah peut fournir 200 A pendant une heure, ou 50 A pendant 4 heures, ou 4 A pendant 50 heures.

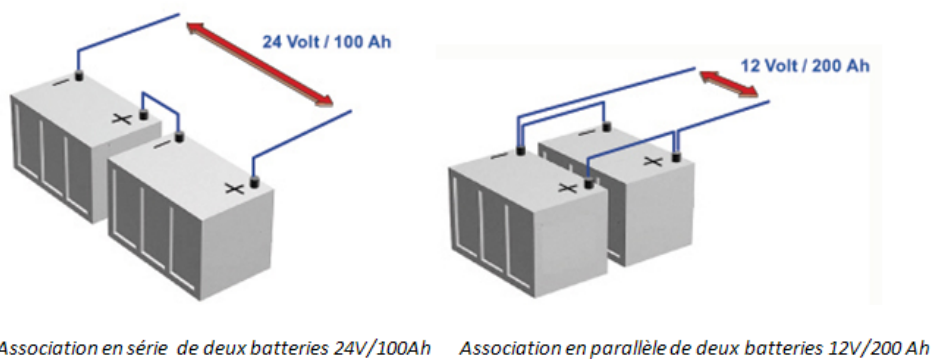


Figure 1-18 : Association de deux batterie 12 /100h

Il existe des facteurs qui peuvent faire varier la capacité d'une batterie tels que :

Rapports de chargement et déchargement : Si la batterie est chargée ou est déchargée à un rythme différent que celui spécifié, la capacité disponible peut augmenter ou diminuer.

Généralement, si la batterie est déchargée à un rythme plus lent, sa capacité augmentera légèrement. Si le rythme est plus rapide, la capacité sera réduite. [15][16]

- **Température :** Un autre facteur qui influe sur la capacité est la température de la batterie et celle de sa température ambiante. Le comportement d'une batterie est spécifié à une température de 27 degrés. Des températures plus faibles réduisent leur capacité significativement. Des températures plus hautes produisent une légère augmentation de leur capacité, mais ceci peut augmenter la perte d'eau et diminuer la durée de vie de la batterie.

Durée de vie : Un accumulateur peut être chargé puis déchargé complètement un certain nombre de fois avant que ses caractéristiques ne se détériorent. Par ailleurs, quelque soit le mode d'utilisation de l'accumulateur, il y'a une durée de vie totale exprimée en année (ou en nombre de cycles)

Profondeur de Décharge : C'est le pourcentage de capacité déchargée ; par exemple si un accumulateur d'une capacité de 100Ah est déchargé de 60Ah, la profondeur de décharge est de 60%.

On limite en général la profondeur de décharge à 80% de la capacité nominale. Pour les applications solaires, la profondeur de décharge ne dépasse guère 50 à 60%.

Rendement : C'est le rapport entre l'énergie électrique restituée par l'accumulateur et l'énergie fournie à l'accumulateur.

Taux d'autodécharge : L'autodécharge est la perte de capacité en laissant l'accumulateur au repos (sans charge) pendant un temps donné.

Tension d'utilisation : c'est la tension à laquelle l'énergie stockée est restituée normalement à la charge.

1-10-3 Modélisation de stockage :

a) Modèle de la charge de la batterie :

Quand la puissance du générateur PV est plus grande que la charge, les batteries sont à l'état de charge, la capacité des batteries au temps t peut être décrite par : [17]

$$C_{Bat}(t) = C_{Bat}(t-1) \cdot (1 - \sigma) + P_{pv}(t) \cdot \eta_{Bat} \quad (1-14)$$

$C_{Bat}(t)$ et $C_{Bat}(t-1)$ sont les quantités de la charge et de la décharge des batteries au temps(t) et (t-1) respectivement, σ est le taux horaire de la charge spontanée, P_{pv} est la puissance du générateur PV, η_{Bat} est le rendement de la batterie.

Pendant la charge de la batterie, le rendement est de (0.65-0.85 selon le courant chargeant), par contre pendant le processus de décharge, le rendement de batterie pris égal à 1.

b) Modèle de la décharge de la batterie : [17]

Quand la demande de charge est plus grande que la puissance produite, la capacité des batteries au temps t peut être exprimée comme suit :

$$C_{Bat}(t) = C_{Bat}(t-1) \cdot (1 - \sigma) - P_{pv}(t) \quad (1-15)$$

A tout moment, la quantité de charge des batteries est sujette aux contraintes suivantes :

$$C_{Bat\ min} \leq C_{Bat}(t) \leq C_{Bat\ max}$$

Ici, la capacité maximale de la batterie prend la valeur de la capacité nominale de la batterie ($C_{Bat\ max} = C_{Bat\ N}$) et la capacité minimum est déterminée par la profondeur de la charge (DOD) :

$$C_{Bat\ min} = DOD \cdot C_{Bat\ N} \quad (1-16)$$

La valeur maximale de l'état de charge (SOC) est égale à 1, et le minimum est déterminé par le maximum de profondeur de décharge, $SOC_{min} = 1 - DOD$

Selon les caractéristiques des fabricants, la durée de vie des batteries peut être prolongée au maximum si DOD prend les valeurs de 30-50%.

La capacité de stockage est une fonction de la charge demandée et de son autonomie.

Elle peut être estimée par la relation suivante: [18]

$$C_{Bat} = \frac{E_c \cdot N_a}{V_b \cdot DOD} \quad (1-17)$$

C_{Bat} : La capacité de stockage de la batterie.

E_c : Énergie consommée

N_a : Le nombre de jours d'autonomie.

V_b : La tension de la batterie

DOD : La profondeur de décharge.

c) Tension de la batterie :

Le modèle suivant, décrit la relation entre la tension, le courant et l'état de charge. Ce modèle se basé sur le schéma électrique (**Figure 1-19**)

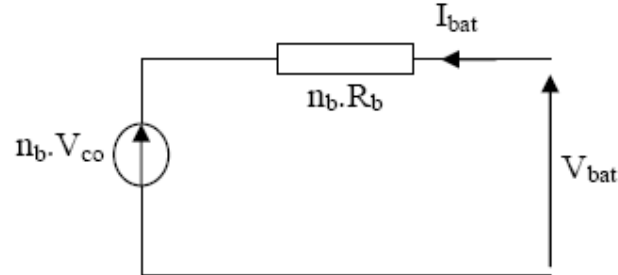


Figure 1-19 : Schéma électrique de la batterie

Pour n batteries en séries, nous pouvons écrire l'équation :

$$V_{bat}(t) = n_b \cdot V_{co}(t) + n_b \cdot I_{bat}(t) \cdot R_{bat}(t) \quad (1-18)$$

$V_{co}(t)$: la tension de circuit ouvert au temps t

d) Courant de batterie

Quand la puissance du générateur PV est plus grande que la charge, les batteries sont à l'état de charge, le courant de charge des batteries au temps t peut être décrit par : [19]

$$I_{Bat} = \frac{P_{pv}(t)}{V_{bat}(t)} \quad (1-19)$$

Quand la puissance du générateur PV ne peut pas subvenir à la demande de la charge, le courant de décharge des batteries est :

$$I_{Bat} = - \frac{P_{pv}(t)}{V_{bat}(t)} \quad (1-20)$$

e) Rendement de la Batterie :

Le rendement de la batterie se calcule par la relation suivante :

$$\eta_{Bat} = \frac{P_{fournie}}{P_{génér}} \quad (1-21)$$

En pratique, le rendement est considéré constant égale à 85%, la tension nominale est de 12V et la capacité de l'ordre de 100A/h. Donc la puissance fournie par une batterie peut s'écrire comme suit :

$$P_{fournie} = \eta_{Bat} \cdot P_{incid} \quad (1-22)$$

($P_{générateur}$: Puissance du générateur)

1-10-4 Différents types de batterie au plomb :

1-10-4-1 Batterie au plomb ouvert :

Sont ainsi nommés car l'électrolyte est liquide et doit être renouvelé. C'est le type le plus ancien et le plus utilisé. Un élément plomb – acide se compose d'électrodes de plomb baignant dans l'acide sulfurique dilué. [20] [21]

1-10-4-2 Batterie au plomb étanche :

Ils ont les mêmes caractéristiques que les plombs 'ouvert' mais sont étanches. Ils peuvent fonctionner dans toutes les positions et ne nécessitent absolument aucun entretien. On les trouve en outre dans des capacités inférieures aux batteries 'ouvert'.

Les avantages essentiels de la batterie au plomb (ouvert ou étanche) pour le photovoltaïque sont les suivants :

- ❖ Longévité
- ❖ Bon rapport qualité/ prix
- ❖ Charge possible à courant faible.

1-10-5 Méthodes de charge des batteries au plomb :

La durée de vie d'une batterie dépend pour l'essentiel du processus de charge optimal en utilisant un régulateur pour limiter la tension.

Il existe plusieurs méthodes pour charger une batterie :

- 1- Avec un courant constant
- 2- Avec une tension constante
- 3- Méthode mixte courant (courant constant puis tension constante)

1-10-6 Entretien des batteries :

Il n'y a que quelques règles simples à respecter :

- ❖ Ne pas les surcharger
- ❖ Ne pas les laisser déchargées
- ❖ Combattre ou éviter la sulfatation
- ❖ Avoir toujours suffisamment d'électrolyte

La durée de vie dépend principalement de la profondeur de décharge journalière.

Conclusion :

Dans ce chapitre on a vu que l'énergie renouvelable est une des nombreuses énergies alternatives actuellement disponible.

L'énergie photovoltaïque est produite à partir du rayonnement solaire, via un composant électronique : la cellule photovoltaïque.

La tension délivrée par le panneau solaire n'est pas constante car elle dépend de l'ensoleillement. Donc il est nécessaire de prévoir un régulateur de charge. Ceci fera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre II Convertisseurs Continu-Continu

II-1 Introduction :

Un convertisseur continu-continu est un dispositif de l'électronique de puissance mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs commandés et qui permet de modifier la valeur de la tension d'une source de tension continue.

Cette conversion d'énergie s'effectue grâce à un "découpage" haute fréquence caractérisée par un rendement élevé (jusqu'à 94% pour les modules à "haut rendement").

Les convertisseurs DC-DC (ou hacheurs) sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour adapter la source DC variable (panneau PV) à la charge qui demande en général une tension DC constante.

II-2 Principe de fonctionnement d'un convertisseur DC/DC :

Les convertisseurs DC/DC en général réalisent deux fonctions: modifier le niveau de tension (élever ou abaisser) et réguler la tension. L'électronique de conversion se trouve à l'interface entre les batteries (la source d'énergie en général) et l'ensemble des blocs constitutifs du système considéré, par exemple des circuits électroniques numériques et analogiques, comme dans les systèmes d'énergie solaire pour adapter la source DC variable (panneau PV) à la charge qui demande en général une tension DC constante.

II-3 Convertisseur dévolteur « BUCK »: [23, 24]

II-3-1 Principe de fonctionnement :

Le fonctionnement d'un convertisseur Buck peut être divisé en deux configurations suivant l'état de l'interrupteur S (voir figure II-1) :

- Dans l'état passant, l'interrupteur S (voir figure II-1) est fermé, la tension aux bornes de l'inductance vaut $V_L = V_i - V_o$. Le courant traversant l'inductance augmente linéairement. La tension aux bornes de la diode étant négative, aucun courant ne la traverse.
- Dans l'état bloqué, l'interrupteur est ouvert. La diode devient passante afin d'assurer la continuité du courant dans l'inductance. La tension aux bornes de l'inductance vaut $V_L = -V_o$. Le courant traversant l'inductance décroît.

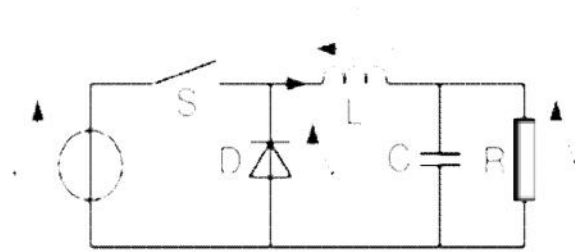


Figure II-1 : Schéma de base d'un convertisseur Buck

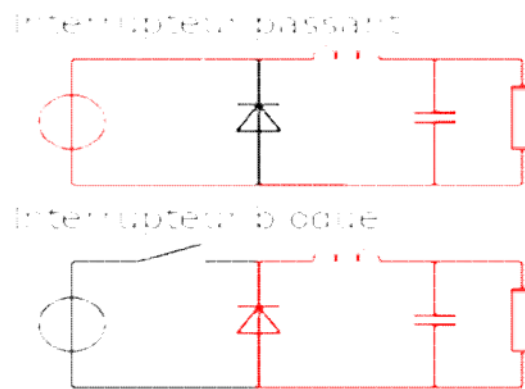


Figure II-2 : Configurations d'un convertisseur Buck suivant l'état de l'interrupteur S

II-3-2 Conduction continue: [24]

Quand un convertisseur Buck travaille en mode de conduction continue, le courant I_L traversant l'inductance ne s'annule jamais. La figure II-3 montre les formes d'ondes du courant et de la tension dans un convertisseur Buck.

Le taux d'accroissement de I_L est donné par :

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} \quad (2-1)$$

Avec V_L égale $V_i - V_o$ pendant l'état passant et $-V_o$ durant l'état bloqué. Par conséquent, l'augmentation de I_L durant l'état passant est donnée par :

$$\Delta I_{L_{on}} = \int_0^{\alpha \cdot T} dI_L = \int_0^{\alpha \cdot T} \frac{V_L}{L} dt = \frac{(V_i - V_o) \cdot \alpha \cdot T}{L} \quad (2-2)$$

De même, la baisse du courant dans l'inductance durant l'état bloqué est donnée

$$\text{par : } \Delta I_{L_{off}} = \int_{\alpha \cdot T}^T dI_L = \int_{\alpha \cdot T}^T \frac{V_L}{L} dt = -\frac{V_o \cdot (T - \alpha \cdot T)}{L} \quad (2-3)$$

Si on considère que le convertisseur est en régime permanent, l'énergie stockée dans chaque composant est la même au début et à la fin de chaque cycle de commutation. En particulier, l'énergie stockée dans l'inductance est donnée par :

$$E = \frac{1}{2} L \times I_L^2 \quad (2-4)$$

En conséquence, le courant I_L traversant l'inductance est le même au début et à la fin de chaque cycle de commutation. Ce qui peut s'écrire de la façon suivante :

$$\Delta I_{L_{on}} + \Delta I_{L_{off}} = 0 \quad (2-5)$$

En remplaçant $\Delta I_{L_{on}}$ et $\Delta I_{L_{off}}$ par leur expression, on obtient :

$$\frac{(V_i - V_o) \cdot \alpha \cdot T}{L} - \frac{V_o \cdot (T - \alpha \cdot T)}{L} = 0 \quad (2-6)$$

Ce qui peut se réécrire de la façon suivante :

$$V_o = \alpha \cdot V_i \quad (2-7)$$

Grâce à cette équation, on peut voir que la tension de sortie varie linéairement avec le rapport cyclique. Le rapport cyclique étant compris entre 0 et 1, la tension de sortie V_o est toujours inférieure à celle d'entrée. C'est pour cela que l'on parle parfois de *dévolteur*.

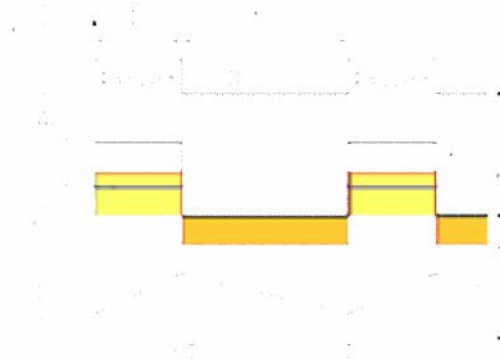


Figure II-3 : Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Buck

II-3-3 Conduction discontinue: [24]

Dans certains cas, la quantité d'énergie demandée par la charge est assez faible pour être transférée dans un temps plus court qu'une période de commutation. Dans ce cas, le courant traversant l'inducteur s'annule pendant une partie de la période. La seule différence avec le principe de fonctionnement décrit précédemment est que l'inductance est complètement déchargée en début de cycle (voir les formes d'ondes sur la figure II-4). Bien que faible, la différence entre conduction continue et discontinue a un fort impact sur la formule de la tension de sortie. La tension de sortie peut être calculée de la façon suivante :

On considère toujours que le convertisseur a atteint le régime permanent. L'énergie stockée dans les composants est donc la même en début et en fin de cycle (elle est nulle dans le cas de la conduction discontinue). Cela engendre aussi que la tension moyenne aux bornes de l'inductance (V_L) est nulle. Ceci se traduit sur la figure 4, par une égalité de l'aire des rectangles jaune et orange :

$$(V_i - V_o) \alpha \cdot T - V_o \cdot \delta \cdot T = 0 \quad (2-8)$$

On peut déduire la valeur de δ et non pas α , AUTRE :

$$\delta = \frac{V_i - V_o}{V_o} \alpha \quad (2-9)$$

En supposant que le condensateur de sortie est suffisamment important pour maintenir la tension de sortie constante pendant un cycle de commutation, le courant de sortie délivré à la charge (I_o) est constant. Cela implique que le courant traversant le condensateur est de valeur moyenne nulle. Par conséquent, nous avons :

$$\bar{I}_L = I_o \quad (2-10)$$

Avec \bar{I}_L le courant moyen traversant l'inductance. Comme on peut le voir sur la figure II-4, le courant i_L traversant l'inductance est de forme triangulaire. Par conséquent, la valeur moyenne de i_L peut donc être calculée géométriquement de la façon suivante :

$$\bar{I}_L = \left(\frac{1}{2} I_{Lmax} \cdot \alpha \cdot T + \frac{1}{2} I_{Lmax} \cdot \delta \cdot T \right) \frac{1}{T} = \frac{I_{Lmax} (\alpha + \delta)}{2} = I_o \quad (2-11)$$

Le courant dans l'inductance est nul en début de cycle puis augmente pendant $\alpha \cdot T$ jusqu'à atteindre I_{Lmax} . Cela veut dire que I_{Lmax} est égale à :

$$I_{L_{Max}} = \frac{V_i - V_o}{L} \alpha \cdot T \quad (2-12)$$

En remplaçant $I_{L_{max}}$ dans les relations précédentes par son expression, on obtient :

$$I_o = \frac{(V_i - V_o) \alpha \cdot T (\alpha + \delta)}{2L} \quad (2-13)$$

On remplace par son expression :

$$I_o = \frac{(V_i - V_o) \alpha \cdot T \left(\alpha + \frac{V_i - V_o}{V_o} \alpha \right)}{2L} \quad (2-14)$$

Qui peut se mettre sous la forme :

$$V_o = V_i \frac{1}{\frac{2L \cdot I_o}{\alpha^2 \cdot V_i \cdot T} + 1} \quad (2-15)$$

On peut voir que l'expression de la tension de sortie est bien plus compliquée que celle obtenue pour la conduction continue. En effet, la tension de sortie dépend non seulement de la tension d'entrée (V_i) et du rapport cyclique α mais aussi de la valeur de l'inductance (L), de la période de commutation (T) et du courant de sortie (I_o).

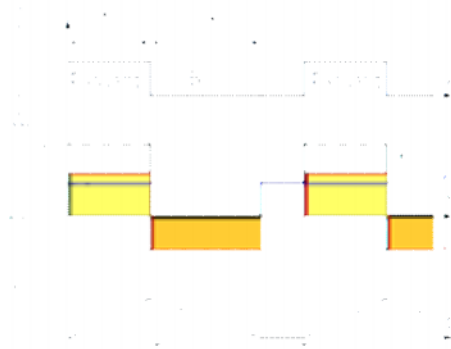


Figure II-4 : Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Buck en conduction discontinue.

II-3-4 Limite entre la conduction continue et discontinue : [24]

Comme expliqué dans le paragraphe précédent, le convertisseur fonctionne en conduction discontinue quand le courant demandé par la charge est faible, et il fonctionne en conduction continue pour les courants plus importants. La limite entre conduction continue et

conduction discontinue est atteinte quand le courant dans l'inductance s'annule juste au moment de la commutation. Avec les notations de la figure 4, cela correspond à :

$$\alpha \cdot T + \delta \cdot T = T \quad (2-16)$$

$$\alpha + \delta = 1 \quad (2-17)$$

Dans ce cas, le courant de sortie I_{olim} (courant de sortie à la limite de la conduction continue et discontinue) est égal au courant moyen traversant l'inductance:

$$I_{olim} = \frac{I_{Lmax} (\alpha + \delta)}{2} = \frac{I_{Lmax}}{2} \quad (2-18)$$

En remplaçant I_{Lmax} par son expression en *conduction discontinue*:

$$I_{olim} = \frac{V_i - V_o}{2L} \alpha \cdot T \quad (2-19)$$

A la limite entre les deux modes de conduction, la tension de sortie obéit aux expressions des deux modes. On utilisera celle donnée pour le mode de conduction continue:

$$V_o = \alpha \cdot V_i \quad (2-20)$$

On peut donc réécrire I_{olim} de la façon suivante:

$$I_{olim} = \frac{V_i (1 - \alpha)}{2L} \alpha \cdot T \quad (2-21)$$

Introduisons deux nouvelles notations :

- La tension normalisée, définie par $|V_o| = \frac{V_o}{V_i}$, (2-22)

Qui correspond au gain en tension du convertisseur.

- Le courant normalisé, défini par $|I_o| = \frac{L}{T \cdot V_i} I_o$. (2-23)

$$T \cdot V_i$$

Le terme L correspond à l'augmentation maximale de courant que l'on peut atteindre lors d'un cycle (variation du courant dans l'inductance atteinte pour $\alpha = 1$). On obtient donc,

en régime permanent, $|I_o|$ égale 0 quand le courant de sortie est nul, et 1 pour le courant maximum que peut fournir le convertisseur.

En utilisant ces notations, on obtient:

- En conduction continue, $|V_o| = \alpha$ (2-24)
- En conduction discontinue,

$$|V_o| = \frac{1}{\frac{2L \cdot I_o}{\alpha^2 \cdot V_i \cdot T} + 1} = \frac{1}{\frac{2|I_o|}{\alpha^2} + 1} = \frac{\alpha^2}{2|I_o| + \alpha^2} \quad (2-25)$$

- Le courant limite entre la conduction continue et discontinue

$$\text{est } I_{o\text{lim}} = \frac{V_i (1 - \alpha)}{2L} \alpha \cdot T = \frac{I_{o\text{lim}}}{|I_o|} \cdot \frac{(1 - \alpha) \alpha}{2} \quad (2-26)$$

- Par conséquent, la frontière entre conduction continue et discontinue est décrite par:

$$\frac{(1 - \alpha) \alpha}{2|I_o|} = 1 \quad (2-27)$$

Cette courbe a été tracée sur la figure II-5. La différence de comportement entre conduction continue et discontinue est très nette. Cela peut engendrer des problèmes d'asservissement de la tension de sortie.

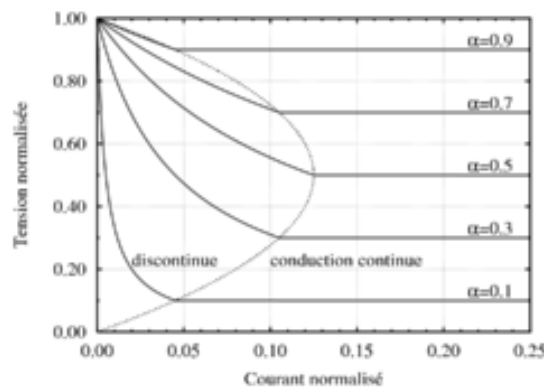


Figure II-5 : Évolution de la tension de sortie normalisée d'un convertisseur Buck avec un courant de sortie normalisé.

II-3-4 Cas du circuit non idéal : [24]

L'étude précédente a été faite avec les hypothèses suivantes:

- Le condensateur de sortie a une capacité suffisante pour fournir une tension constante, au cours d'un cycle de fonctionnement, à la charge (une simple résistance)
- La chute de tension aux bornes de la diode est nulle
- Pas de pertes par commutation dans les semi-conducteurs
- Pas de pertes dans les composants d'une manière générale

Ces hypothèses peuvent être très éloignées de la réalité, les imperfections des composants réels pouvant avoir des effets importants sur le fonctionnement du convertisseur.

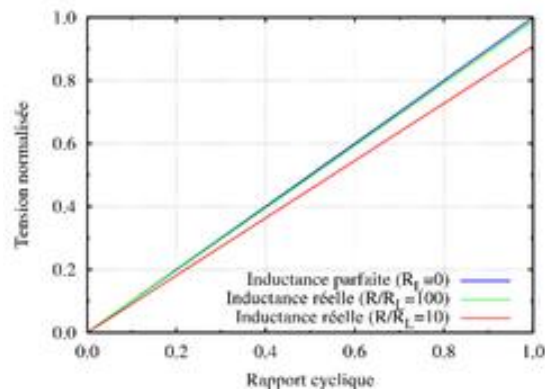


Figure II-6: Évolution de la tension de sortie d'un convertisseur Buck en fonction du rapport cyclique quand la résistance parasite de l'inductance augmente.

II-4 Convertisseur survolteur « Boost »:

II-4-1 Principe de fonctionnement : [24]

Le fonctionnement d'un convertisseur Boost peut être divisé en deux phases distinctes selon l'état de l'interrupteur S (voir figure II-7) :

- Une phase d'accumulation d'énergie : lorsque l'interrupteur S est fermé (état passant), cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance donc le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique. La diode D est alors bloquée et la charge est alors déconnectée de l'alimentation.
- Lorsque l'interrupteur est ouvert, l'inductance se trouve alors en série avec le générateur et sa f.é.m. s'additionne à celle du générateur (effet survolteur). Le courant traversant l'inductance traverse ensuite la diode D, le condensateur C et la charge R. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité.

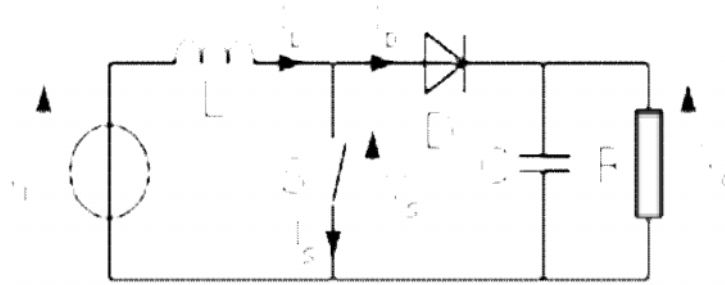


Figure II-7 : Schéma de base d'un convertisseur Boost

II-4-2 Conduction continue :

Quand un convertisseur Boost travaille en mode de conduction continue, le courant I_L traversant l'inductance ne s'annule jamais. La figure II-9 montre les formes d'ondes du courant et de la tension dans un convertisseur Boost.

La tension de sortie est calculée de la façon suivante (en considérant les composants comme parfaits) :

Durant l'état passant, l'interrupteur S est fermé, entraînant l'augmentation du courant suivant la relation :

$$V_i = L \frac{dI_L}{dt} \quad (2-28)$$

À la fin de l'état passant, le courant I_L a augmenté de :

$$\Delta I_{L\text{On}} = \int_0^{\alpha T} dI_L = \int_0^{\alpha T} \frac{V_i \cdot dt}{L} = \frac{V_i \cdot \alpha \cdot T}{L} \quad (2-29)$$

α étant le rapport cyclique. Il représente la fraction de la période T pendant laquelle l'interrupteur S conduit. α est compris entre 0 (S ne conduit jamais) et 1 (S conduit tout le temps).

Pendant l'état bloqué, l'interrupteur S est ouvert, le courant traversant l'inductance circule à travers la charge. Si on considère une chute de tension nulle aux bornes de la diode et un condensateur suffisamment grand pour garder sa tension constante, l'évolution de I_L est :

$$V_i - V_o = L \frac{dI_L}{dt} \quad (2-30)$$

Par conséquent, la variation de I_L durant l'état bloqué

$$\text{est } \Delta I_{L\text{Off}} = \int_0^{(1-\alpha)T} dI_L = \int_0^{(1-\alpha)T} \frac{(V_i - V_o) dt}{L} = \frac{(V_i - V_o)(1 - \alpha)T}{L} \quad (2-31)$$

Si on considère que le convertisseur a atteint son régime permanent, la quantité d'énergie stockée dans chacun de ces composants est la même au début et à la fin d'un cycle de fonctionnement. En particulier, l'énergie stockée dans l'inductance est donnée par :

$$E = \frac{1}{2} L \cdot I_L^2 \quad (2-32)$$

En conséquence, le courant traversant l'inductance est le même au début et à la fin de chaque cycle de commutation. Ce qui peut s'écrire de la façon suivante :

$$\Delta I_{L\text{On}} + \Delta I_{L\text{Off}} = 0 \quad (2-33)$$

En remplaçant $\Delta I_{L\text{On}}$ et $\Delta I_{L\text{Off}}$ par leur expression, on obtient :

$$\Delta I_{L\text{On}} + \Delta I_{L\text{Off}} = \frac{V_i \cdot \alpha \cdot T}{L} + \frac{(V_i - V_o)(1 - \alpha)T}{L} = 0 \quad (2-34)$$

Ce qui peut se réécrire de la façon suivante :

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 - \alpha} \quad (2-35)$$

Grâce à cette dernière expression, on peut voir que la tension de sortie est toujours supérieure à celle d'entrée (le rapport cyclique variant entre 0 et 1), qu'elle augmente avec α , et que théoriquement elle peut être infinie lorsque α se rapproche de 1. C'est pour cela que l'on parle de survolteur.

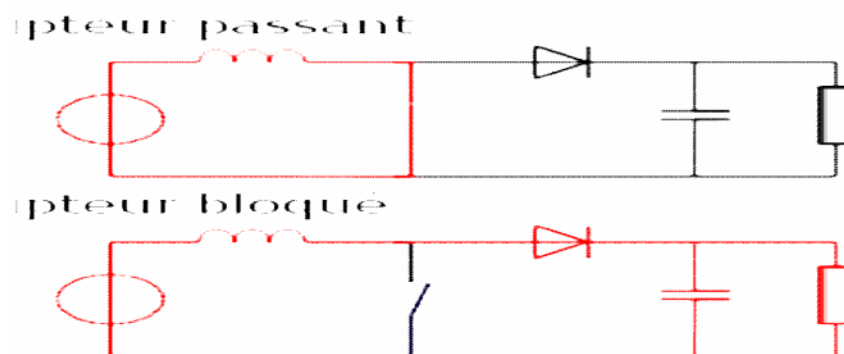


Figure II-8 : Configurations d'un convertisseur Boost suivant l'état de l'interrupteur S

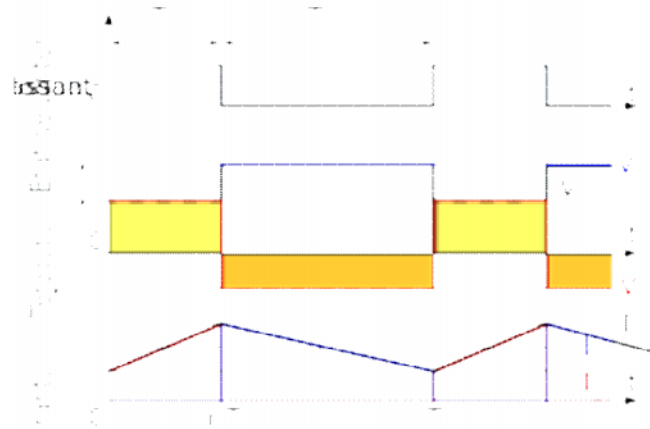


Figure II-9 : Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Boost

II-4-3 Conduction discontinue :

Dans certains cas, la quantité d'énergie demandée par la charge est assez faible pour être transférée dans un temps plus court qu'une période de commutation. Dans ce cas, le courant traversant l'inducteur s'annule pendant une partie de la période. La seule différence avec le principe de fonctionnement décrit précédemment, est que l'inductance est complètement déchargée en début de cycle (voir les formes d'ondes sur la figure II-10). Bien que faible, la différence entre conduction continue et discontinue a un fort impact sur la formule de la tension de sortie. La tension de sortie peut être calculée de la façon suivante :

Comme le courant de l'inductance est nul en début de cycle, son maximum $I_{L_{Max}}$ (à $t = \alpha \cdot T$) vaut :

$$I_{L_{Max}} = \frac{V_i \cdot \alpha \cdot T}{L} \quad (2-36)$$

Pendant l'état bloqué, I_L s'annule après $\delta \cdot T$:

$$I_{L_{Max}} + \frac{(V_i - V_o) \cdot \delta \cdot T}{L} = 0 \quad (2-37)$$

En utilisant les deux dernières équations, δ vaut :

$$\delta = \frac{V_i \cdot \alpha}{V_o - V_i} \quad (2-38)$$

Le courant dans la charge I_o est égal au courant moyen traversant la diode (I_D). Comme on peut le voir sur la figure II-10, le courant traversant la diode est égal à celui dans l'inductance pendant l'état bloqué.

Par conséquent, le courant traversant la diode peut être écrit de la façon suivante :

$$I_o = \bar{I}_D = \frac{I_{L_{max}} \delta}{2} \quad (2-39)$$

En remplaçant $I_{L_{max}}$ et δ par leurs expressions respectives, on obtient :

$$I_o = \frac{V_i \cdot \alpha \cdot T}{2L} \frac{V_i \cdot \alpha}{V_o - V_i} = \frac{V_i^2 \cdot \alpha^2 \cdot T}{2L (V_o - V_i)} \quad (2-40)$$

Par conséquent, le gain de tension en sortie peut être écrit de la façon suivante :

$$\frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{V_i \cdot \alpha^2 \cdot T}{2L \cdot I_o} \quad (2-41)$$

Cette expression est bien plus complexe que celle obtenue lors de l'étude en conduction continue. En conduction discontinue, le gain en tension dépend du rapport cyclique mais aussi de la tension d'entrée, de la valeur de l'inductance et du courant de sortie.

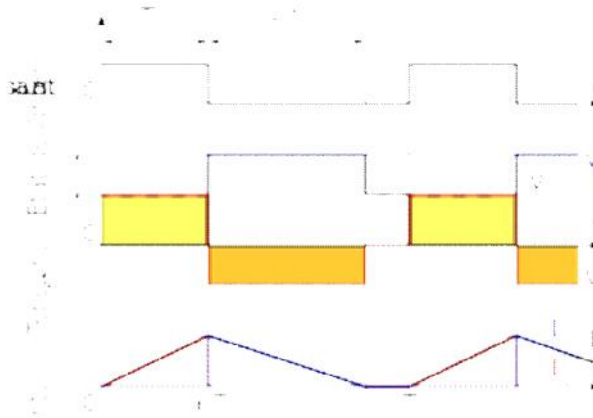


Figure II-10 : Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Boost en conduction discontinue.

II-4-4 Limite entre la conduction continue et discontinue :

Comme expliqué dans le paragraphe précédent, le convertisseur fonctionne en conduction discontinue quand le courant demandé par la charge est faible, et il fonctionne en conduction continue pour les courants plus importants. La limite entre conduction continue et

conduction discontinue est atteinte quand le courant dans l'inductance s'annule juste au moment de la commutation. Avec les notations de la figure II-10, cela correspond à :

$$\alpha \cdot T + \delta \cdot T = T \quad (2-42)$$

$$\alpha + \delta = 1 \quad (2-43)$$

Dans ce cas, le courant de sortie I_{olim} (courant de sortie à la limite de la conduction continue et discontinue) est donné par la relation :

$$I_{o_{lim}} = \bar{I}_D = \frac{I_{L_{max}}}{2} (1 - \alpha) \quad (2-44)$$

En remplaçant $I_{L_{max}}$ par son expression en *conduction discontinue* :

$$I_{o_{lim}} = \frac{V_i \cdot \alpha \cdot T}{2L} (1 - \alpha) \quad (2-45)$$

À la limite entre les deux modes de conduction, la tension de sortie obéit aux expressions des deux modes. On utilisera celle donnée pour le mode de conduction continue :

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 - \alpha} \quad (2-46)$$

On peut donc réécrire I_{olim} de la façon suivante :

$$I_{o_{lim}} = \frac{V_i \cdot T}{2L} \frac{V_i}{V_o} \left(1 - \frac{V_i}{V_o}\right) \quad (2-47)$$

Introduisons deux nouvelles notations :

- La tension normalisée, définie par $|V_o| = \frac{V_o}{V_i}$, qui correspond au gain en tension du convertisseur.
- Le courant normalisé, défini par $|I_o| = \frac{L}{T \cdot V_i} I_o$. Le terme $\frac{T \cdot V_i}{L}$ correspond à l'augmentation maximale de courant que l'on peut atteindre lors d'un cycle (variation du courant dans l'inductance atteinte pour $\alpha = 1$). On obtient donc, en régime permanent, $|I_o|$ égale 0 quand le courant de sortie est nul, et 1 pour le courant maximum que peut fournir le convertisseur.

En utilisant ces notations, on obtient :

- en conduction continue, $|V_o| = \frac{1}{1 - \alpha}$; (2-48)

- en conduction discontinue, $|V_o| = 1 + \frac{V_i \cdot \alpha^2 \cdot T}{2L \cdot I_o} = 1 + \frac{\alpha^2}{2|I_o|}$;(2-49)

- le courant limite entre la conduction continue et discontinue

$$I_{o_{lim}} = \frac{V_i \cdot T}{2L} \alpha (1 - \alpha) = \frac{I_{o_{lim}}}{2|I_o|} \alpha (1 - \alpha)$$

(2-50)

Par conséquent, la frontière entre conduction continue et discontinue est décrite

$$\text{par : } \frac{1}{2|I_o|} \alpha (1 - \alpha) = 1$$

(2-51)

Cette courbe a été tracée sur la figure II-11. La différence de comportement entre conduction continue et discontinue est très nette. Cela peut engendrer des problèmes d'asservissement de la tension de sortie.

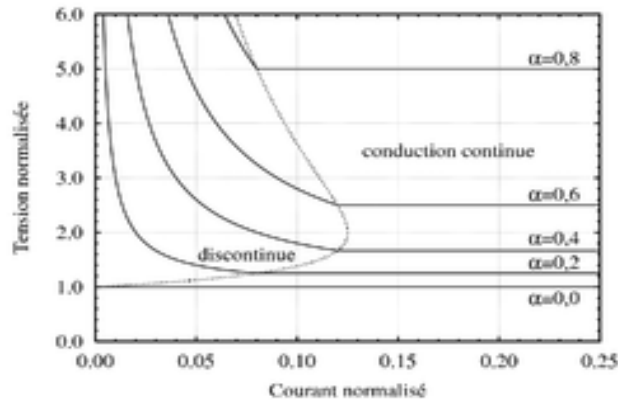


Figure II-11 : Evolution de la tension de sortie normalisée d'un convertisseur Boost avec un courant de sortie normalisé.

II-5 Convertisseur dévolteur-survolteur « Buck-Boost » : [23 , 24]

Un convertisseur Buck-Boost est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible ou plus grande valeur mais de polarité inverse. Un inconvénient de ce convertisseur est que son interrupteur ne possède pas de borne reliée au zéro, compliquant ainsi sa commande.

II-5-1 Mode de fonctionnement :

Le fonctionnement d'un convertisseur Buck-Boost peut être divisé en deux configurations suivant l'état de l'interrupteur S (voir figure II-13) :

- Dans l'état passant, l'interrupteur S (voir figure II-12) est fermé, conduisant ainsi à une augmentation de l'énergie stockée dans l'inductance.
- Dans l'état bloqué, l'interrupteur S est ouvert. L'inductance est reliée à la charge et à la capacité. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité et la charge.

Comparé aux convertisseurs Buck et Boost, les principales différences sont:

- La tension de sortie est de polarité inverse de celle d'entrée
- La tension de sortie peut varier de 0 à $-\infty$ (pour un convertisseur idéal).

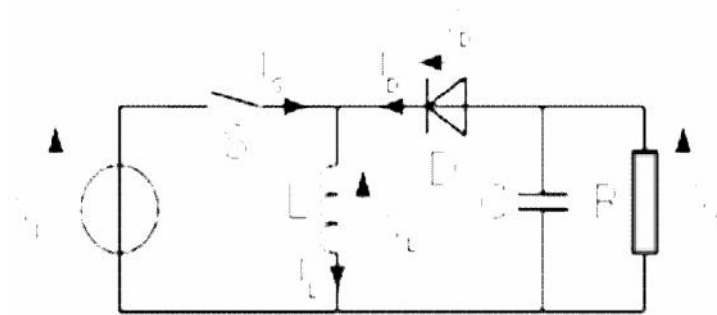


Figure II-12 : Schéma de base d'un convertisseur Buck-Boost

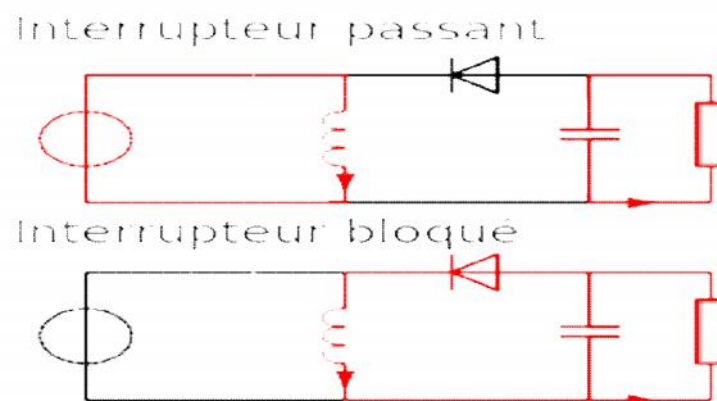


Figure II-13 : Configurations d'un convertisseur Buck-Boost suivant l'état de l'interrupteur S

II-5-2 Conduction continue :

Quand un convertisseur Buck-Boost travaille en mode de conduction continue, le courant I_L traversant l'inductance ne s'annule jamais. La figure II-14 montre les formes d'ondes du courant et de la tension dans un convertisseur Boost.

La tension de sortie est calculée de la façon suivante (en considérant les composants comme parfaits):

Durant l'état passant, l'interrupteur S est fermé, entraînant l'augmentation du courant suivant la relation:

$$V_i = L \frac{dI_L}{dt} \quad (2-52)$$

À la fin de l'état passant, le courant I_L a augmenté de:

$$\Delta I_{L_{On}} = \int_0^{\alpha T} dI_L = \int_0^{\alpha T} \frac{V_i \cdot dt}{L} = \frac{V_i \cdot \alpha \cdot T}{L} \quad (2-53)$$

α étant le rapport cyclique. Il représente la durée de la période T pendant laquelle l'interrupteur S conduit. α est compris entre 0 (S ne conduit jamais) et 1 (S conduit tout le temps).

Pendant l'état bloqué, l'interrupteur S est ouvert, le courant traversant l'inductance circule à travers la charge. Si on considère une chute de tension nulle aux bornes de la diode et un condensateur suffisamment grand pour garder sa tension constante, l'évolution de I_L est:

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_o}{L} \quad (2-54)$$

Par conséquent, la variation de I_L durant l'état bloqué est:

$$\Delta I_{L_{Off}} = \int_0^{(1-\alpha)T} dI_L = \int_0^{(1-\alpha)T} \frac{V_o \cdot dt}{L} = \frac{V_o (1 - \alpha) T}{L} \quad (2-55)$$

Si on considère que le convertisseur est en régime permanent, l'énergie stockée dans chaque composant est la même au début et à la fin de chaque cycle de commutation. En particulier, l'énergie stockée dans l'inductance est donnée par :

$$E' = \frac{1}{2} L \times I_L^2 \quad (2-56)$$

En conséquence, le courant I_L traversant l'inductance est le même au début et à la fin de chaque cycle de commutation. Ce qui peut s'écrire de la façon suivante :

$$\Delta I_{L_{on}} + \Delta I_{L_{off}} = 0 \quad (2-57)$$

En remplaçant $\Delta I_{L_{on}}$ et $\Delta I_{L_{off}}$ par leur expression, on obtient :

$$\Delta I_{L_{on}} + \Delta I_{L_{off}} = \frac{V_i \cdot \alpha \cdot T}{L} + \frac{V_o (1 - \alpha) T}{L} = 0 \quad (2-58)$$

Ce qui peut se réécrire de la façon suivante :

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (2-59)$$

Grâce à cette dernière expression, on peut voir que la tension de sortie est toujours négative (le rapport cyclique α variant entre 0 et 1), que sa valeur absolue augmente avec α , théoriquement jusqu'à l'infini lorsque α approche 1. Si on omet la polarité, ce convertisseur est à la fois dévolteur (comme le convertisseur Buck) et survolteur (comme le convertisseur Boost). C'est pour cela qu'on le qualifie de Buck-Boost.

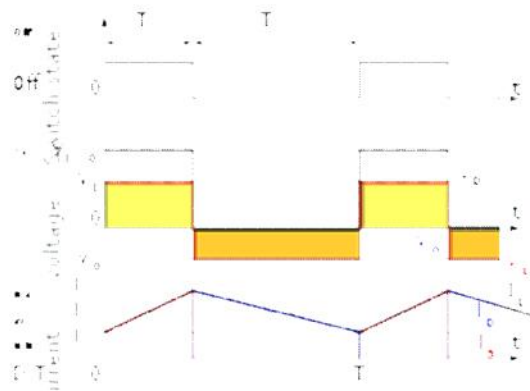


Figure II-14 : Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Buck-Boost

II-5-3 Conduction discontinue :

Dans certains cas, la quantité d'énergie demandée par la charge est assez faible pour être transférée dans un temps plus court qu'une période de commutation. Dans ce cas, le courant traversant l'inducteur s'annule pendant une partie de la période. La seule différence avec le principe de fonctionnement décrit précédemment, est que l'inductance est complètement déchargée en début de cycle (voir les formes d'ondes sur la figure II-15). Bien

que faible, la différence entre conduction continue et discontinue a un fort impact sur la formule de la tension de sortie. La tension de sortie peut être calculée de la façon suivante :

Comme le courant de l'inductance est nul en début de cycle, son maximum $I_{L_{Max}}$ (a $t = \alpha \cdot T$) vaut :

$$I_{L_{Max}} = \frac{V_i \cdot \alpha \cdot T}{L} \quad (2-60)$$

Pendant l'état bloqué, I_L s'annule après $\delta \cdot T$:

$$I_{L_{Max}} + \frac{V_o \cdot \delta \cdot T}{L} = 0 \quad (2-61)$$

En utilisant les deux dernières équations, δ vaut:

$$\delta = -\frac{V_i \cdot \alpha}{V_o} \quad (2-62)$$

Le courant dans la charge I_o est égal au courant moyen traversant la diode (I_D). Comme on peut le voir sur la figure II-15, le courant traversant la diode est égal à celui dans l'inductance pendant l'état bloqué.

Par conséquent, le courant traversant la diode peut être écrit de la façon suivante :

$$I_o = I_D = \frac{I_{L_{max}} \delta}{2} \quad (2-63)$$

En remplaçant $I_{L_{max}}$ et δ par leurs expressions respectives, on obtient :

$$I_o = -\frac{V_i \cdot \alpha \cdot T}{2L} \frac{V_i \cdot \alpha}{V_o} = -\frac{V_i^2 \cdot \alpha^2 \cdot T}{2L \cdot V_o} \quad (2-64)$$

Par conséquent, le gain de tension en sortie peut être écrit de la façon suivante :

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{V_i \cdot \alpha^2 \cdot T}{2L \cdot I_o} \quad (2-65)$$

Cette expression est bien plus complexe que celle obtenue lors de l'étude en conduction continue. En conduction discontinue, le gain en tension dépend du rapport cyclique mais aussi de la tension d'entrée, de la valeur de l'inductance et du courant de sortie.

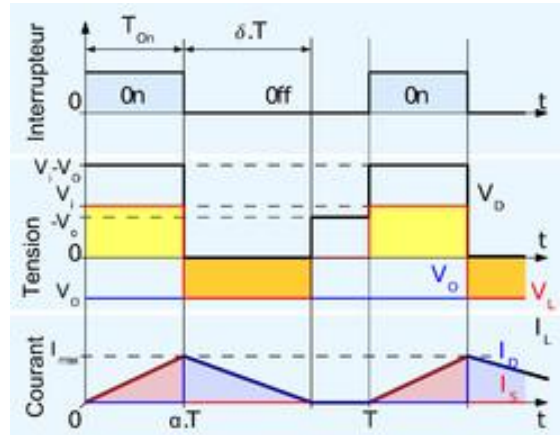


Figure II-15 : Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Buck-Boost en conduction discontinue.

II-5-4 Limite entre la conduction continue et discontinue :

Comme expliqué dans le paragraphe précédent, le convertisseur fonctionne en conduction discontinue quand le courant demandé par la charge est faible, et il fonctionne en conduction continue pour les courants plus importants. La limite entre conduction continue et conduction discontinue est atteinte quand le courant dans l'inductance s'annule juste au moment de la commutation. Avec les notations de la figure II-15, cela correspond à :

$$\alpha \cdot T + \delta \cdot T = T \quad (2-66)$$

$$\alpha + \delta = 1 \quad (2-67)$$

Dans ce cas, le courant de sortie I_{olim} (courant de sortie à la limite de la conduction continue et discontinue) est donné par la relation :

$$I_{olim} = I_D = \frac{I_{Lmax}}{2} (1 - \alpha) \quad (2-68)$$

En remplaçant I_{Lmax} par son expression en *conduction discontinue*:

$$I_{olim} = \frac{V_i \cdot \alpha \cdot T}{2L} (1 - \alpha) \quad (2-69)$$

A la limite entre les deux modes de conduction, la tension de sortie obéit aux expressions des deux modes. On utilisera celle donnée pour le mode de conduction continue :

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (2-70)$$

On peut donc réécrire $I_{o\lim}$ de la façon suivante :

$$I_{o\lim} = \frac{V_i \cdot \alpha \cdot T}{2L} \frac{V_i}{V_o} (-\alpha) \quad (2-71)$$

Introduisons deux nouvelles notations :

- La tension normalisée, définie par $|V_o| = \frac{V_o}{V_i}$, qui correspond au gain en tension du convertisseur.
- Le courant normalisé, défini par $|I_o| = \frac{L}{T \cdot V_i} I_o$. Le terme $\frac{T \cdot V_i}{L}$ correspond à l'augmentation maximale de courant que l'on peut atteindre lors d'un cycle (variation du courant dans l'inductance atteinte pour $\alpha = 1$). On obtient donc, en régime permanent, $|I_o|$ égale 0 quand le courant de sortie est nul, et 1 pour le courant maximum que peut fournir le convertisseur.

En utilisant ces notations, on obtient :

- En conduction continue, $|V_o| = -\frac{\alpha}{1-\alpha}$ (2-72)

- En conduction discontinue, $|V_o| = -\frac{\alpha^2}{2|I_o|}$ (2-73)

- Le courant limite entre la conduction continue et discontinue

$$\text{est } I_{o\lim} = \frac{V_i \cdot T}{2L} \alpha (1 - \alpha) = \frac{I_{o\lim}}{2|I_o|} \alpha (1 - \alpha) \quad (2-74)$$

Par conséquent, la frontière entre conduction continue et discontinue est décrite

$$\text{par : } \frac{1}{2|I_o|} \alpha (1 - \alpha) = 1 \quad (2-75)$$

Cette courbe a été tracée sur la figure II-16. La différence de comportement entre conduction continue et discontinue est très nette. Cela peut engendrer des problèmes d'asservissement de la tension de sortie.

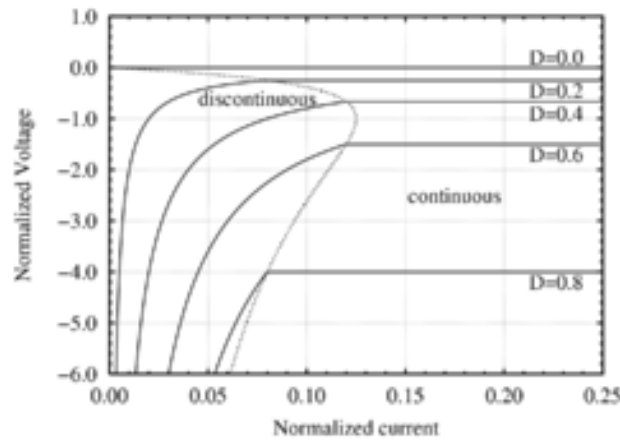


Figure II-16 : Évolution de la tension de sortie normalisée d'un convertisseur Buck-Boost avec un courant de sortie normalisé.

II-6 Convertisseur SEPIC : [25, 26]

II-6-1 Mode de fonctionnement:

Asymétrique convertisseur primaire-inducteur (SEPIC) est un type de convertisseur continu-continu permettant au potentiel électrique (tension) à sa sortie soit supérieur à, inférieur à, ou égal à celui en entrée, la sortie de l'SEPIC est commandé par le cycle de travail du transistor de commande.

Un SEPIC est similaire à un traditionnel convertisseur abaisseur-élévateur , mais présente des avantages d'avoir la sortie non inversée (la sortie a la même polarité de la tension en tant que l'entrée), à l'aide d'un condensateur en série pour coupler l'énergie à partir de l'entrée à la sortie (et, partant, peut répondre avec plus de grâce à une sortie de court-circuit), et être capable de vrai arrêt: lorsque l'interrupteur est éteint, la sortie tombe à 0 V, suite à une décharge transitoire assez lourd de la charge.

Les Régulateurs de type SEPIC sont utiles dans des applications dans lesquelles une tension de la batterie peut être au-dessus et au-dessous de celui de la sortie prévue du régulateur. Par exemple, une seule batterie au lithium-ion se décharge typiquement de 4,2 volts à 3 volts, si d'autres composants nécessitent 3,3 volts, alors la SEPIC serait efficace.

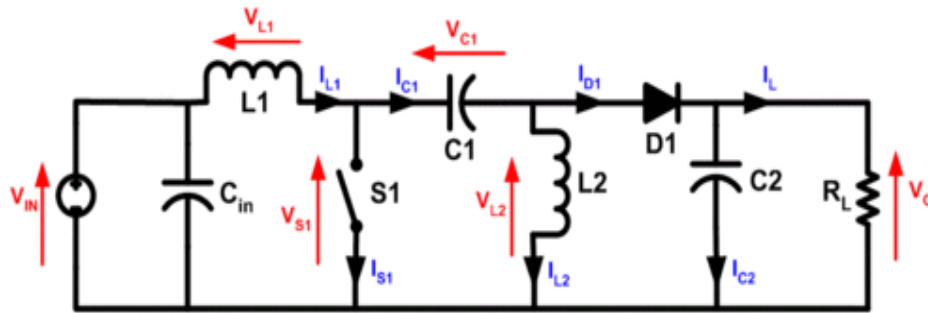


Figure II-12: Schéma de SEPIC.

Le schéma de principe d'un SEPIC de base est représenté sur la figure II-12. Comme avec d'autres alimentations à découpage (en particulier des convertisseurs DC-CC), la SEPIC échange de l'énergie entre les condensateurs et inductances afin de convertir d'une tension à une autre. La quantité d'énergie échangée est commandé par l'interrupteur S1, qui est généralement un transistor tel qu'un transistor MOSFET ; MOSFET offrent beaucoup plus élevé impédance d'entrée et de chute inférieure de tension à transistors à jonction bipolaire (BJT), et ne nécessitent pas de résistances de polarisation (tel que le transistor MOSFET de commutation est commandé par les différences de tension plutôt que d'un courant, comme avec BJT).

Les formes d'ondes de tensions et de courants du convertisseur SEPIC sont montrées aux dans les figures:

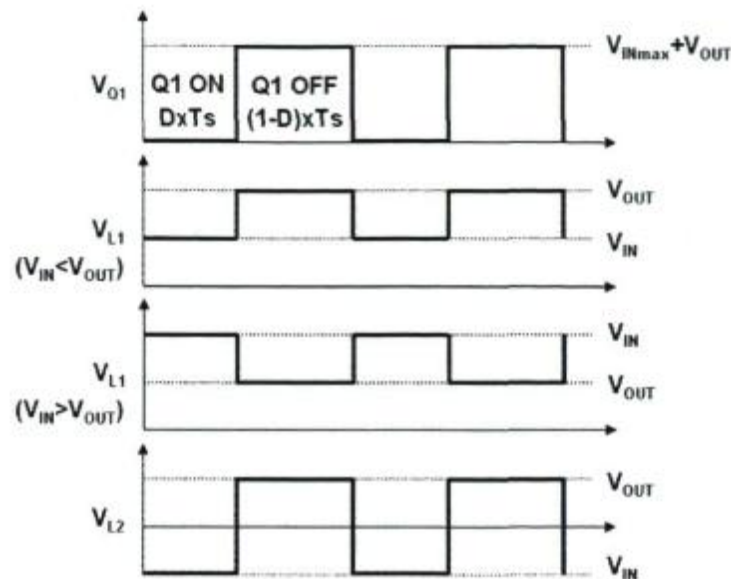


Figure II-13 : Formes d'ondes de tensions du convertisseur SEPIC

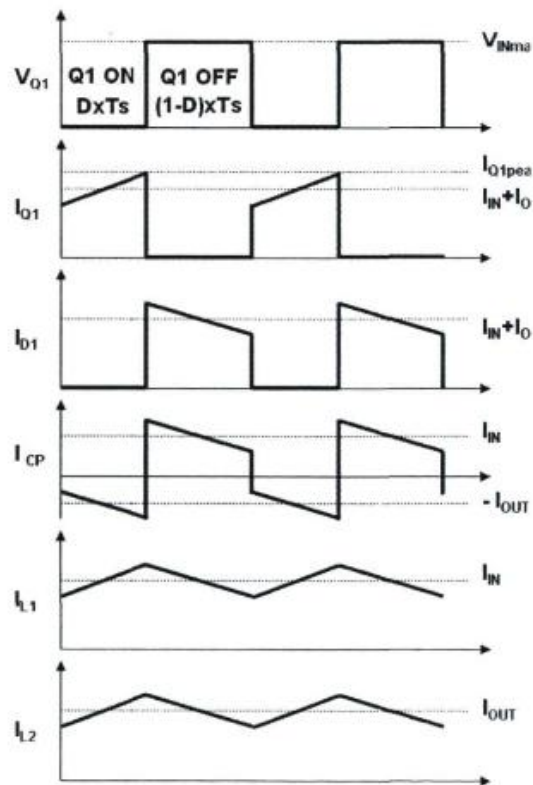


Figure II-14 : Formes d'ondes de courants du convertisseur SEPIC

II-6-2 Phase de conduction

Pendant la phase de conduction, Q_1 est en état passant (ON), la tension aux bornes de l'inductance L_1 est égale à V_{in} , le condensateur C_p est connecté en parallèle avec L_2 et la tension aux bornes de L_2 est la même que la tension du condensateur est égale à moins V_{in} .

La diode D_1 est en polarisation inverse donc bloquée. Le courant de la charge est fourni par le condensateur C_{out} .

Pendant cette période le courant est stocké en L_1 par l'entrée et en L_2 par C_p .

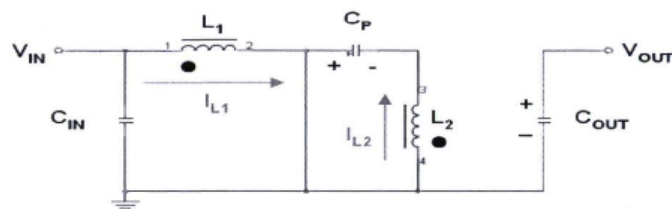


Figure II-15 : SEPIC pendant la phase de conduction

II-6-3 État de récupération

Pendant la phase de récupération, Q_1 est en état bloqué (OFF), le courant dans L_1 continue à circuler à travers C_p et la diode D_1 puis dans le condensateur C_{out} , dans l'intervalle le condensateur C_p est chargé et prêt pour le prochain cycle. Aussi le courant emmagasiné dans L_2 circule dans C_{out} et la charge, rendant C_{out} prêt pour le prochain cycle.

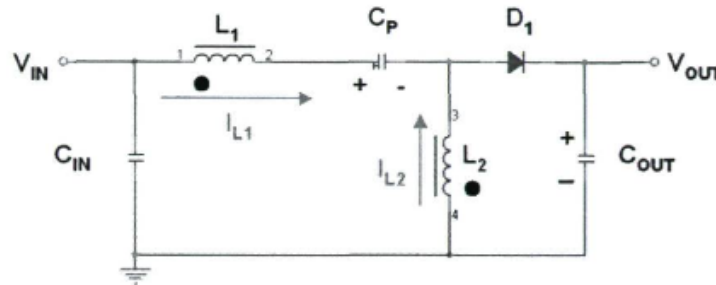


Figure II-16 : SEPIC pendant la phase de récupération

II-6-4 Dimensionnement du SEPIC [27]

II-6-4-1 Calcul du rapport cyclique

On aura la relation suivante pour un rendement de 100%

$$\alpha = \frac{V_{OUT} + V_{\alpha}}{V_{IN} + V_{OUT} + V_{\alpha}} \quad (2-76)$$

Le rapport cyclique maximum est :

$$\alpha_{max} = \frac{V_{OUT} + V_{\alpha}}{V_{IN(min)} + V_{OUT} + V_{\alpha}} \quad (2-77)$$

Le rapport cyclique minimum est :

$$\alpha_{min} = \frac{V_{OUT} + V_{\alpha}}{V_{IN} + V_{OUT} + V_{\alpha}} \quad (2-78)$$

II-6-4-2 Choix des inductances

Les valeurs d'inductances sont déterminées principalement par l'ondulation de courant acceptée.

Généralement, on autorise une ondulation de 40% le courant d'entrée maximal pour la tension d'entrée minimale. L'ondulation de courant est définie par l'équation suivante

$$\Delta I_L = I_N \cdot 40\% = I_{OUT} \cdot \frac{(V_{OUT} + V_\alpha)}{V_{IN(MIN)} \cdot \eta} \quad (2-79)$$

Les courantes crêtes des inductances :

$$I_{L1(PEAK)} = I_{OUT} \cdot \left(\frac{V_{OUT} + V_\alpha}{V_{IN(MIN)}} \right) \left(1 + \frac{40\%}{2} \right) \quad (2-80)$$

$$I_{L2(PEAK)} = I_{OUT} \cdot \left(1 + \frac{40\%}{2} \right) \quad (2-81)$$

Avec deux bobines séparées l'inductance est donnée par :

$$L_1 = L_2 = L = \frac{V_{IN(MIN)}}{\Delta I_L \cdot 2 F_{SW}} \cdot \alpha_{MAX} \quad (2-82)$$

Où F_{sw} est la fréquence de découpage

II-6-4-3 Choix des condensateurs

➤ Condensateur de sortie C_{out}

Dans le convertisseur SEPIC, lorsque l'interrupteur Q_1 est en conduction, l'inductance L_1 est en charge et le courant de sortie est fourni par le condensateur C_{out} de sortie. Donc, C_{out} doit avoir une capacité suffisante pour minimiser les ondulations dans la tension de sortie.

On a:

$$I_{Cout(RMS)} = I_{OUT} \sqrt{\frac{V_{OUT} \times V_\alpha}{V_{IN(MIN)}}} \quad (2-83)$$

Alors, la valeur de C_{out} doit satisfaire la condition suivante :

$$C_{OUT} \geq \frac{I_{OUT} \cdot \alpha_{MAX}}{\Delta V_{RIPPLE} \cdot F_{SW}} \quad (2-84)$$

Où ΔV_{RIPPLE} : Ondulation de la tension de sortie qui est définie par l'exigence de la conception.

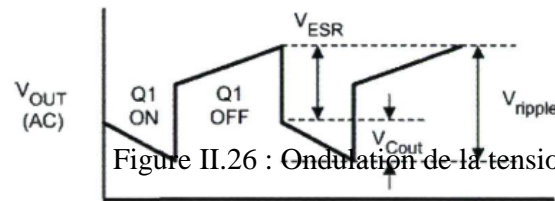


Figure II.26 : Ondulation de la tension de sortie.

Figure II-17 : Ondulation de la tension de sortie.

Condensateur de couplage C_p

$$I_{CP(RMS)} = \frac{I_{OUT} \cdot (V_{OUT} + V_\alpha)}{V_{IN(MIN)} \cdot \eta} \cdot \sqrt{\frac{1 - \alpha_{max}}{\alpha_{max}}} \quad (2-85)$$

$$C_P = \frac{I_{OUT} \cdot \alpha_{max}}{\Delta V_{CP} \cdot f_S} \quad (2-86)$$

ΔV_{CP} : L'ondulation de la tension aux bornes de C_p

II-6-4-4 Choix du MOSFET

Le transistor doit être sélectionné en prenant en considération la tension et le courant de crête

$$I_{QIPeak} = \frac{I_{OUT} \cdot (V_{OUT} + V_{\alpha})}{V_{IN(MIN)} \cdot \eta} + I_{OUT} + \Delta I_L \quad (2-87)$$

$$I_{QIRMS} = \frac{I_{OUT} \cdot V_{OUT}}{V_{IN(MIN)} \cdot \eta \cdot \sqrt{\alpha_{max}}} \quad (2-88)$$

II-7 Conclusion :

Les hacheurs ont différentes applications : par exemple le hacheur parallèle est utilisé dans des applications de faible tension comme les systèmes d'éclairage portatifs, ainsi dans des applications de grandes tensions dans les véhicules hybrides. Les hacheurs permettent d'avoir un rendement fiable de tension, il est par ailleurs possible d'abaisser la tension de l'alimentation ou l'élever selon l'utilisation (charge). L'allure des tensions et des courants dépend de la charge si elle est interrompue au ininterrompue.

La tension délivrée à la plupart des charges est de type alternatif. Il nous faut insérer un onduleur dans le cycle de conversion. L'étude de l'onduleur fera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre III Onduleurs monophasés

III-1 Introduction :

Un générateur photovoltaïque produit du courant électrique continu et peut donc alimenter uniquement des charges qui fonctionnent avec ce type de courant, en général avec des tensions de 12, 24 et 48V. Habituellement les charges fonctionnent en courant alternatif et si l'installation est reliée au réseau électrique, le courant distribué doit nécessairement être de ce type pour le réseau monophasé 220V / 50Hz et 380V / 50Hz pour le réseau triphasé.

A partir de cela, il est nécessaire de transformer le courant continu en sortie du générateur photovoltaïque en courant alternatif : c'est le rôle demandé à l'onduleur.

Donc les onduleurs sont des convertisseurs statiques continu-alternatif permettant de fabriquer une source de tension alternative à partir d'une source de tension continue.

Ils sont constitués de composants actifs et passifs performants qui admettent cependant un certain nombre de limitations qui ne sont pas sans conséquence sur la synthèse des boucles de commande

III-2 Origine des convertisseurs de puissance électrique

Les premiers convertisseurs de puissance électrique ont été réalisés avec des machines électriques couplées mécaniquement.

Une machine à courant alternatif d'une part (de type synchrone ou asynchrone) couplée au réseau permettait de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique à vitesse fixe.

Une machine à courant continu d'autre part dont l'excitation commandée permettait de disposer d'une tension continue variable en sortie.

Le développement des composants de puissance au milieu du 20^e siècle (électronique de puissance) a permis de développer des convertisseurs de puissance électrique sans machines tournantes.

La technologie des composants utilisés (semi-conducteurs) ne cesse d'évoluer :

- faible coût

- puissances commutées élevées
- facilité de contrôle.

III-3 Caractéristiques propres d'un onduleur pour systèmes photovoltaïques [28]

Les onduleurs destinés aux systèmes photovoltaïques diffèrent un peu des onduleurs classiques en électrotechnique, mais l'objectif de conversion DC/AC est le même. La principale caractéristique de l'onduleur PV réside dans la recherche du point de fonctionnement maximal ou MPPT en anglais « Maximum Power Point Tracking » car le générateur PV a une caractéristique courant/tension non-linéaire.

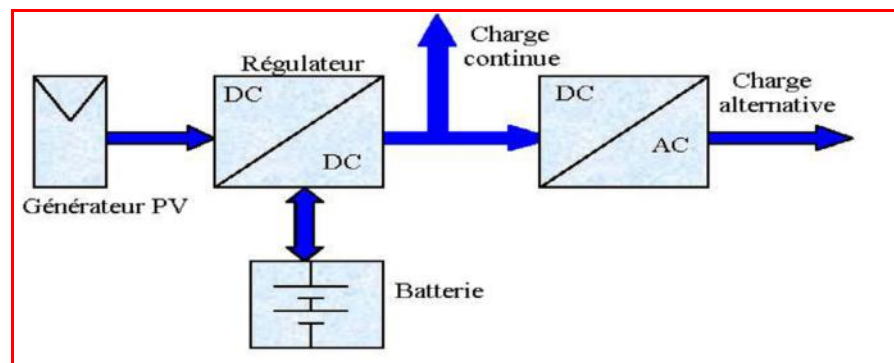


Figure III-1 :Schéma synoptique d'un système photovoltaïque

III-3-1 Principe de la Recherche du MPPT [29]:

La figure (III-2) représente le schéma de principe d'un convertisseur MPPT (Maximum Power Point Tracker) classique. La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (CS), à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le générateur PV peut fournir. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du CS en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPP (Maximum Power Point).

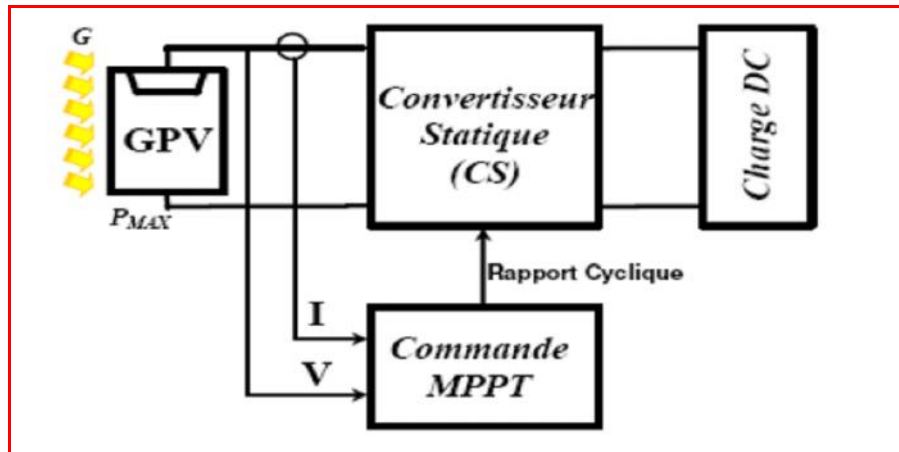


Figure III-2 :Schéma de principe du convertisseur MPPT

III-4 Classification

De nombreux essais de classification plus ou moins avantageux, ont été élaborés .Il existe plusieurs centaines de schémas d'onduleurs, chacun correspondant à un type d'application déterminé ou permettant des performances recherchés.

En général, les classifications sont liées aux modes de commutation des éléments semi-conducteurs constituant l'onduleur.

Un premier mode de classification qui se présente comme une nécessité, peut être fait, on dissocie grossièrement les différents onduleurs existants en :

- Onduleurs non autonomes.
- Onduleurs autonomes.

III-4-1 Onduleur non autonomes

Les onduleurs sont non autonomes quand la fréquence et la tension alternative sont imposées par le réseau qu'ils alimentent. Dans ces onduleurs la commutation est naturelle. Elle est naturelle en ce sens que ce sont les tensions alternatives du réseau qui effectuent le transfert du courant d'un thyristor à l'autre.

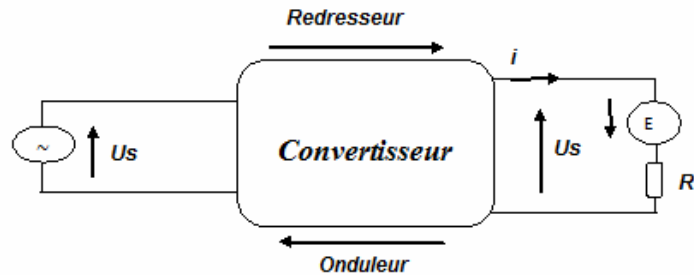


Figure III-3 : Principe de l'onduleur non autonome

III-4-2 Onduleur autonome :

Les onduleurs autonomes (ou oscillateurs) génèrent leur propre fréquence et leur propre tension alternative. Dans ces onduleurs la commutation est forcée.

Un onduleur autonome dépend essentiellement de la nature du générateur et du récepteur entre lesquels il est monté. Cela conduit à distinguer :

- Onduleur de tension alimenté par une source de tension continue.
- Onduleur de courant alimenté par une source de courant continu

La tension ou le courant de sortie d'un onduleur de tension ou de courant peut être formé d'un seul créneau par alternance. Mais grâce aux progrès sur les semi-conducteurs de puissance et sur leur commande, on utilise de plus en plus la modulation de largeur d'impulsion (chaque alternance est formée de plusieurs créneaux de largeur convenables). Cela facilite beaucoup le filtrage de la tension ou du courant de sortie.

III-5 Généralités :

Un convertisseur continu-alternatif permet d'obtenir une tension alternative (éventuellement réglable en fréquence et en amplitude) à partir d'une source de tension continue.

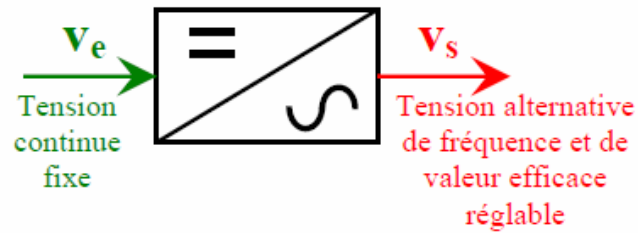


Figure III-4 Schéma de principe de l'onduleur

III-5-1 Onduleur en pont à commande symétrique [30]:

La structure électrique est identique à celle du hacheur en pont et la commande se fait avec le rapport cyclique $a = 0,5$.

III-5-1-1 Schéma :

La commande des interrupteurs(transistors)respecte l'ordre suivant :

- de 0 à $T/2$: T_1 et T_4 fermés T_2 et T_3 ouverts
- de $T/2$ à T : T_1 et T_4 ouverts T_2 et T_3 fermés

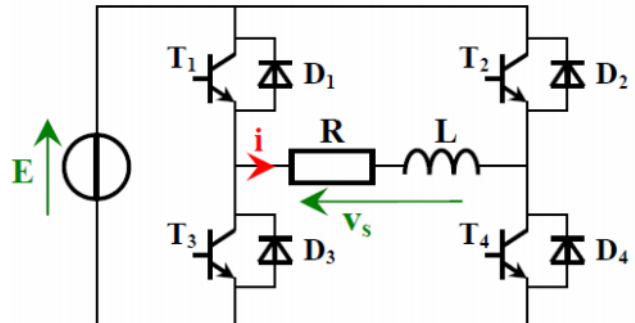


Figure III-4-a

III-5-1-2 Chronogrammes :

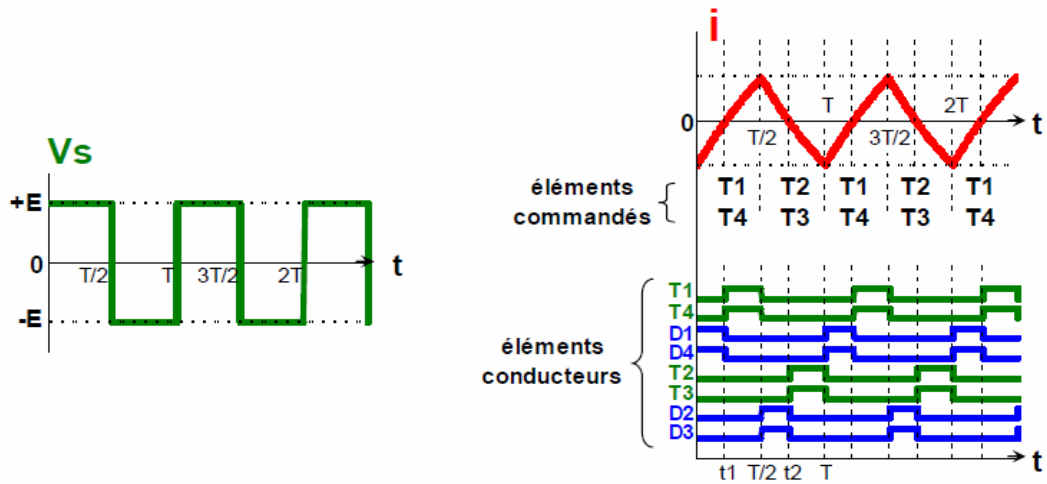


Figure III-4-b

III-5-1-3 Analyse des chronogrammes pour $0 \leq t < T$:

- de 0 à t_1 : T_1 et T_4 sont commandés,

$v_s = +E$ donc i augmente mais est encore négatif

le courant passe donc par les diodes D_1 et D_4

➤ C'est la **phase de récupération** (l'énergie est renvoyée vers la source).

- de t_1 à $T/2$: T_1 et T_4 sont toujours commandés,

le courant i est devenu positif

les transistors T_1 et T_4 sont conducteurs (D_1 et D_4 se bloquent).

➤ C'est la **phase d'alimentation** (l'énergie est fournie par la source).

- de $T/2$ à t_2 : T_2 et T_3 sont commandés,

$v_S = -E$ donc i diminue mais est encore positif

le courant passe donc par les diodes D_2 et D_3 .

➤ C'est la **phase de récupération** (l'énergie est renvoyée vers la source).

- de t_2 à T : T_2 et T_3 sont toujours commandés,

le courant i est devenu négatif

les transistors T_2 et T_3 sont conducteurs (D_2 et D_3 se bloquent).

➤ C'est la **phase d'alimentation** (l'énergie est fournie par la source).

III-5-2 Onduleur en pont à commande décalée :

La structure électrique est identique à celle de l'onduleur en pont à commande symétrique.

La commande des transistors présente un **décalage de durée t_0** (chronogrammes ci-dessous):

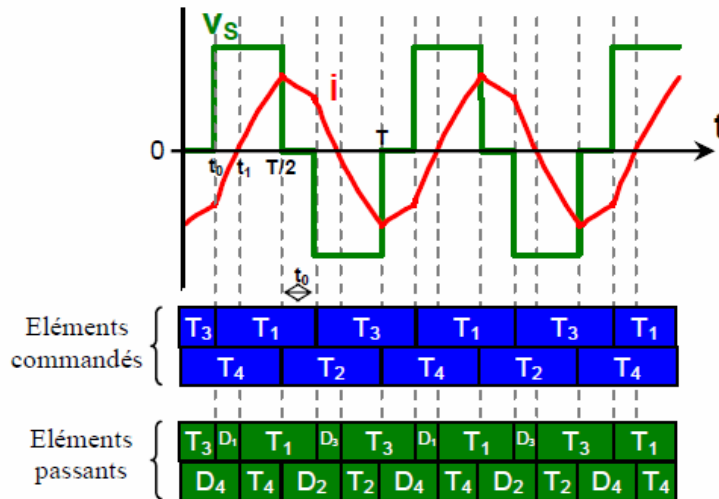


Figure III-4-c

III-5-2-1 Analyse des chronogrammes pour $0 \leq t < T$:

- de 0 à t_0 : T_3 et T_4 sont commandés,

$v_s = 0V$ donc i tend vers 0 mais est encore négatif

le courant passe donc par T_3 et D_4

➤ C'est la **phase de roue libre** (l'énergie est dissipée dans la résistance).

- de t_0 à t_1 : T_1 et T_4 sont commandés,

$v_S = +E$ donc i augmente mais est encore négatif

le courant passe donc par les diodes D_1 et D_4

➤ C'est la **phase de récupération** (l'énergie est renvoyée vers la source).

- de t_1 à $T/2$: T_1 et T_4 sont toujours commandés,

le courant i est devenu positif

les transistors T_1 et T_4 sont conducteurs (D_1 et D_4 se bloquent).

➤ C'est la **phase d'alimentation** (l'énergie est fournie par la source).

- de $T/2$ à $T/2+t_0$: T_1 et T_2 sont commandés,

$v_S = 0V$ donc i tend vers 0 mais est encore positif

le courant passe donc par T_1 et T_2

➤ C'est la **phase de roue libre** (l'énergie est dissipée dans la résistance).

-de $T/2+t_0$ à $T/2+t_1$: T_3 et T_2 sont commandés,

$v_S = -E$ donc i diminue mais est encore positif

le courant passe donc par les diodes D_2 et D_3 .

➤ C'est la **phase de récupération** (l'énergie est renvoyée vers la source).

- de $T/2+t_2$ à T : T_3 et T_2 sont toujours commandés,

le courant i est devenu négatif

les transistors T_2 et T_3 sont conducteurs (D_2 et D_3 se bloquent).

➤ C'est la **phase d'alimentation** (l'énergie est fournie par la source).

III-5-3 Onduleur en pont à commande MLI :

La structure électrique est toujours la même (pont à 4 transistors et 4 diodes).

La commande est plus complexe, il s'agit d'une commande symétrique (pas de décalage) présentant un grand nombre de commutations par période avec des ouvertures et des fermetures d'interrupteurs de durées modulées.

La tension de sortie v_S présente alors des "impulsions" de largeurs variables (**Modulation de Largeur d'Impulsion**).

Un exemple d'allure de v_S et de i est représentée ci-dessous (on remarque que le courant est presque sinusoïdal):

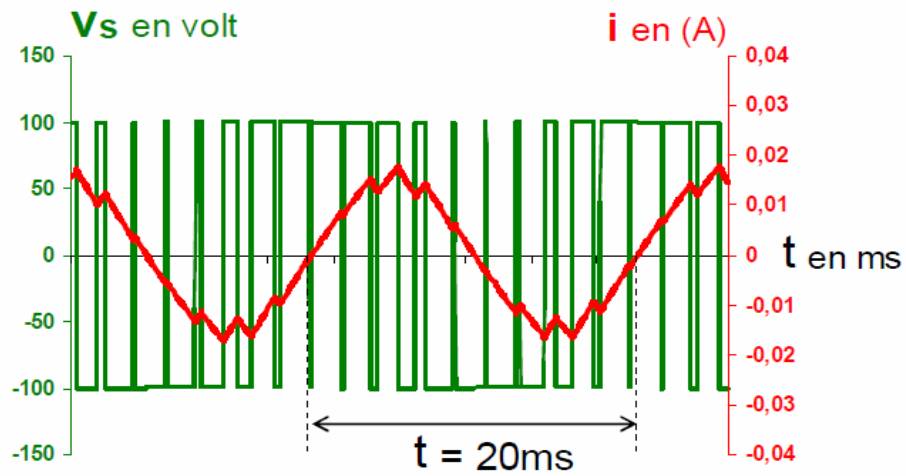


Figure III-4-d

III-5-3-1 Analyse globale du chronogramme :

- $V_s = +E$: T3 et T4 sont commandés

Le courant augmente exponentiellement (charge RL)

- $V_s = -E$: T1 et T2 sont commandés

Le courant diminue exponentiellement (charge RL)

C'est la durée de chaque impulsion qui va permettre au courant d'être le plus sinusoïdal possible.

III-5-4 Onduleur de secours pour le matériel informatique :

L'onduleur de secours permet d'assurer la continuité de l'alimentation en cas de coupures sur le réseau.

Il permet aussi de filtrer les éventuels défauts de la tension du réseau (parasites ou surtensions).

La structure comprend un accumulateur avec dispositif de charge et un onduleur avec sortie filtrée (schéma ci-dessous):

Variation de vitesse des moteurs à courant alternatif

L'intérêt de l'onduleur est de pouvoir produire une tension alternative réglable en amplitude et en fréquence.

La vitesse des moteurs synchrones et asynchrones est directement liée à la fréquence d'alimentation; un onduleur réglable en fréquence permettra donc de faire varier la vitesse de ces moteurs.

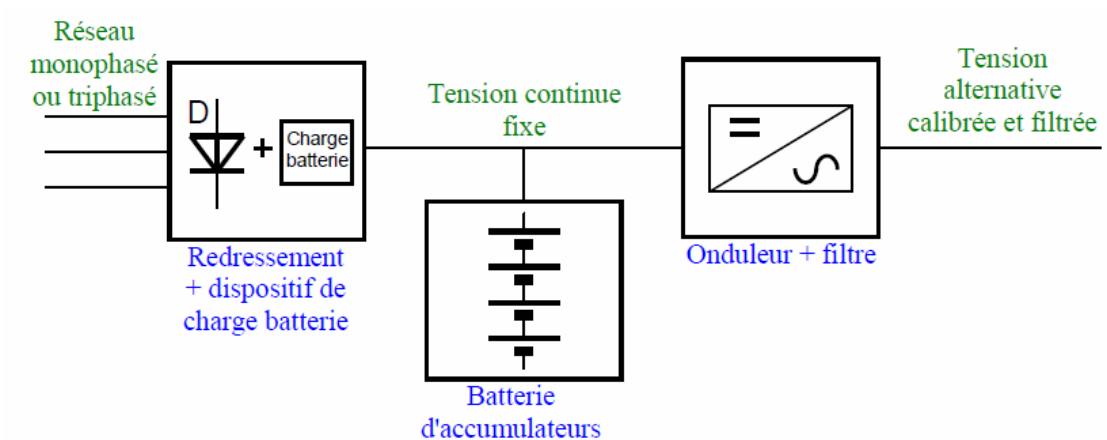


Figure III-4-e : Principe d'un convertisseur de fréquence

III-6 Réalisation pratique :

Le principe de base et la constitution d'un simple onduleur sont :

- Créer aux bornes de la charge une tension de valeur positive et négative en alternance.
- Utilisation de l'électronique de puissance.
- Utilisation d'interrupteurs bidirectionnels formés par un transistor et une diode montée en antiparallèle (voir schéma).
- Commande permettant de gérer les interrupteurs.

III-6-1 Interrupteurs bidirectionnels [30]:

a-schéma :

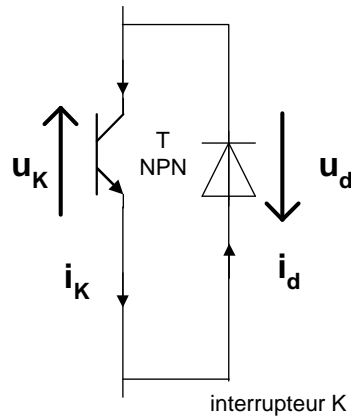


Figure III-5 Interrupteur bidirectionnel

b-Explication :

Le transistor constitue l'élément commandé. Il est unidirectionnel tout comme la diode. L'assemblage des deux composants permet de créer un bloc qui sera, lui, bidirectionnel.

Pour l'étude théorique, nous supposons toujours que les composants sont parfaits (tension à leurs bornes nulles lorsqu'ils sont conducteurs). Ainsi, le transistor sera schématisé par un interrupteur parfait.

Au point de vue du vocabulaire, nous dirons qu'un interrupteur est susceptible d'être passant lorsqu'il est commandé à la fermeture. Inversement, il sera bloqué quand il est commandé à l'ouverture.

III-6-2 Onduleur à quatre interrupteurs [30]:

III-6-2-1 Schéma du montage :

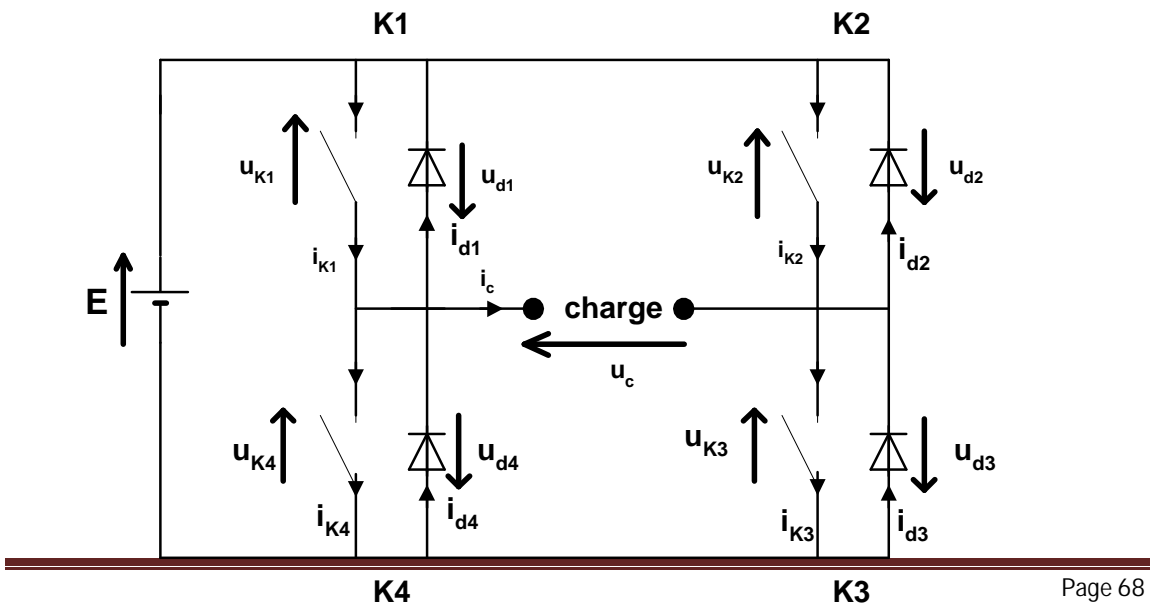


Figure III-6 Onduleur à quatre interrupteurs

III-6-2-2 Analyse du fonctionnement :

Nous nommerons K chaque interrupteur bidirectionnel. A l'aide de la maquette, chacun est commandé indépendamment des autres. Il a été dit précédemment que le but est de créer aux bornes de la charge une tension alternative.

Pour cela, il suffit de commander les interrupteurs deux à deux. Nous verrons deux types de commandes :

- **Commande symétrique.**
- **Commande décalée.**

Dans un premier temps, nous étudierons la commande la plus simple (symétrique) puis nous verrons la commande décalée avec ce qu'elle apporte de plus. Dans les deux cas, l'allure de la tension dépend uniquement de la commande utilisée et non pas de la charge. Seul dépendra de la charge, l'allure des courants.

III-6-2-2-1 Commande symétrique :

Cette commande se résume à commander les interrupteurs $K1$ et $K3$ à la fermeture pendant une demi-période puis de commander $K2$ et $K4$ durant la deuxième demi-période. (Nous sous-entendons que les interrupteurs non commandés à la fermeture sont en fait commandés à l'ouverture).

L'analyse se décompose en deux phases :

- 1^{ère} phase : $K1$ et $K3$ sont commandés à la fermeture de l'instant 0 à $\frac{T}{2}$. Durant cette durée

$K2$ et $K4$ sont ouverts.

Nous obtenons donc le schéma équivalent très simple suivant :

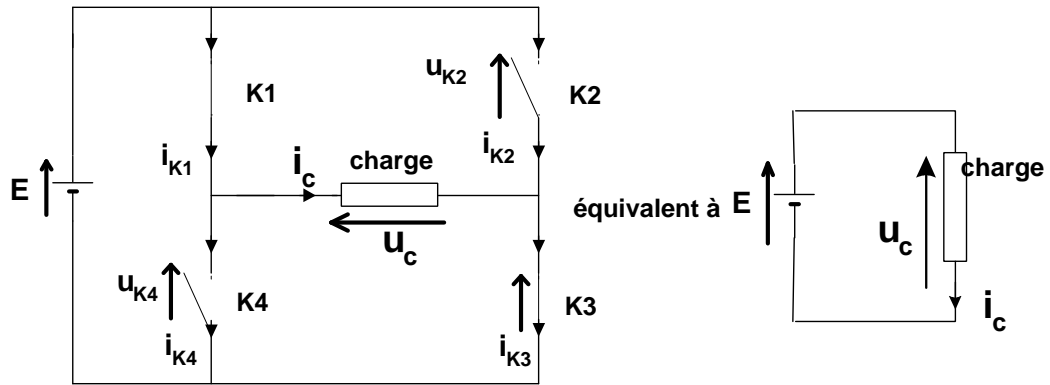


Figure III-7-1 1^{ère} phase et leur équivalent

La tension aux bornes de la charge aura donc la valeur $u_c = E$.

- 2^{ème} phase : K2 et K4 sont à leur tour commandés à la fermeture de l'instant $\frac{T}{2}$ à T. Le schéma équivalent sera le suivant :

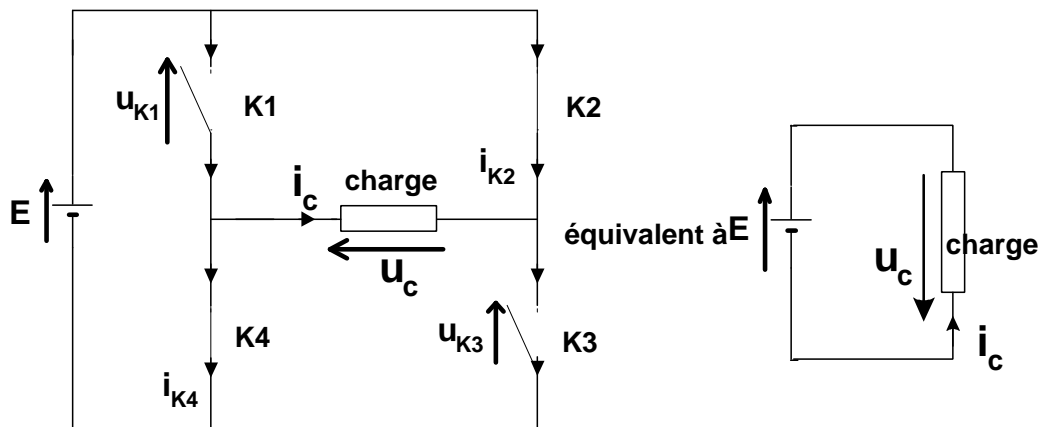


Figure III-7-2 2^{ème} phase et leur équivalent

Durant cette phase

$u_c = -E$

Il suffit donc de dessiner des oscillogrammes suivant la charge choisie: **charge résistive R**

La valeur efficace de la tension aux bornes de la charge est fixée par la tension d'alimentation.

Nous obtenons donc les valeurs suivantes :

$$U_c = E$$

$$\langle u_c \rangle = 0 \text{ V}$$

➤ **Charge inductive RL :**

La charge inductive simule un moteur alternatif. Nous nous apercevons que pour cette charge, seule l'allure des différents courants change.

Dans l'utilisation sur une charge résistive pure, nous voyons que les diodes sont inutiles.

Elles trouvent leur fonction dans le cas d'une charge inductive.

Elles évitent une discontinuité dans la conduction du courant et prennent donc le relais des transistors, quand ceux-ci bien qu'étant commandés à la fermeture, ne peuvent pas conduire car ils sont unidirectionnels.

De plus, il faut remarquer que la charge fournit de la puissance à l'alimentation quand les diodes sont passantes. Il s'agit de **phases de récupération**.

Ces phases de récupération nécessitent d'utiliser des alimentations en tension réversible en courant.

III-6-2-2-2 Commande décalée :

Cette commande, plus sophistiquée dans sa conception, est une première étape vers l'obtention d'un courant sinusoïdale. Si nous nous attachons à une analyse spectrale, nous verrions dans la commande précédente que la tension, ainsi que le courant, sont riches en harmoniques ce qui pose des problèmes pour une utilisation avec des moteurs (pertes joules, couples pulsatoires ...).

La commande décalée permet d'éliminer en partie ces harmoniques et améliore donc le convertisseur. D'ailleurs l'allure du courant s'en ressent.

Au niveau de la commande, il suffit de décaler la fermeture des différents interrupteurs dans un ordre précis (ordre donné ci-dessous). Nous traçons à nouveau les oscillogrammes.

La puissance échangée par la charge comporte une phase de plus avec la commande décalée. Pendant deux intervalles de temps, elle est nulle : il s'agit de phase de roue libre. Au cours de ces intervalles, l'énergie emmagasinée par la bobine est cédée à la résistance car la tension aux bornes de la charge est nulle.

III-7 Fonctionnement de la maquette [30]:

Afin d'avoir une maquette facile à utiliser, car rappelons que le but est de créer un outil accessible rapidement, il fallait limiter le câblage et les manipulations diverses. Dans ce but, la mise sous tension de la maquette se fait grâce à une alimentation unique et sous 24 V. Il suffira donc de brancher l'alimentation, la charge (qui est facilement repérable sur la maquette) et les divers appareils de mesures.

La faible tension permet d'éviter les problèmes de sécurité car le travail sera sous tension non dangereuse. Malgré tout, comme cela est obligatoire maintenant, toutes les douilles seront des douilles de sécurité. Par contre, il ne nous a pas semblé nécessaire de fermer complètement la plaque.

Au niveau du fonctionnement, la maquette permet de gérer la commande des interrupteurs par l'intermédiaire d'un pic (16F84A).

Pour obtenir une commande symétrique, il suffit de commander deux à deux les interrupteurs, par contre la commande décalée nécessite la possibilité de les commander un à un.

Sur la maquette, il y a quatre blocs de mini interrupteurs que nous appellerons des switches (afin de différencier des interrupteurs du pont de puissance) correspondant chacun à la commande d'un interrupteur.

Ces switches sont en fait composés de six commutateurs. Le schéma ci-dessous montre leur disposition ainsi que la conception de chacun.

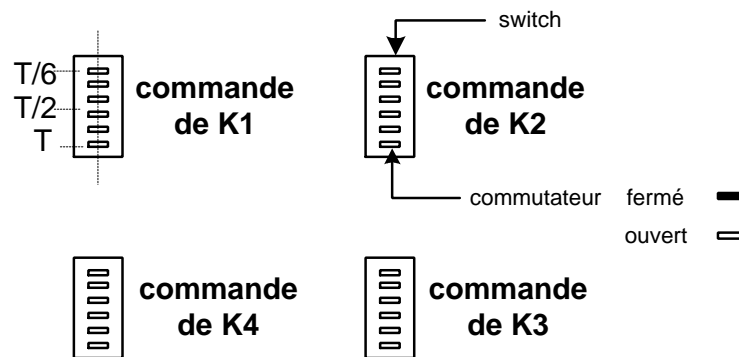


Figure III-8 Conception et disposition des switches

- Il a fallu décomposer la période du signal en six intervalles. Chaque commutateur de chaque switch commande 1/6 de la période du signal.
- En clair, prenons l'exemple de l'interrupteur appelé K1:

switch lui a été associé. Pour que K1 soit passant de l'instant 0 à $\frac{T}{6}$, il suffira de mettre le premier commutateur du switch associé en position fermée.

Si nous voulons commander K1 de l'instant $\frac{T}{6}$ à $\frac{T}{2}$, nous fermerons les commutateurs deux et trois du Switch.

Le fonctionnement est le même pour chaque interrupteur (K1, K2, K3, K4). Dès lors, il est possible de créer la forme de la tension aux bornes de la charge (qui dépend de l'état des interrupteurs) souhaitée.

Nous verrons, dans l'exploitation pédagogique, quelle séquence sur les Switch est nécessaire pour les deux commandes (symétrique et décalée).

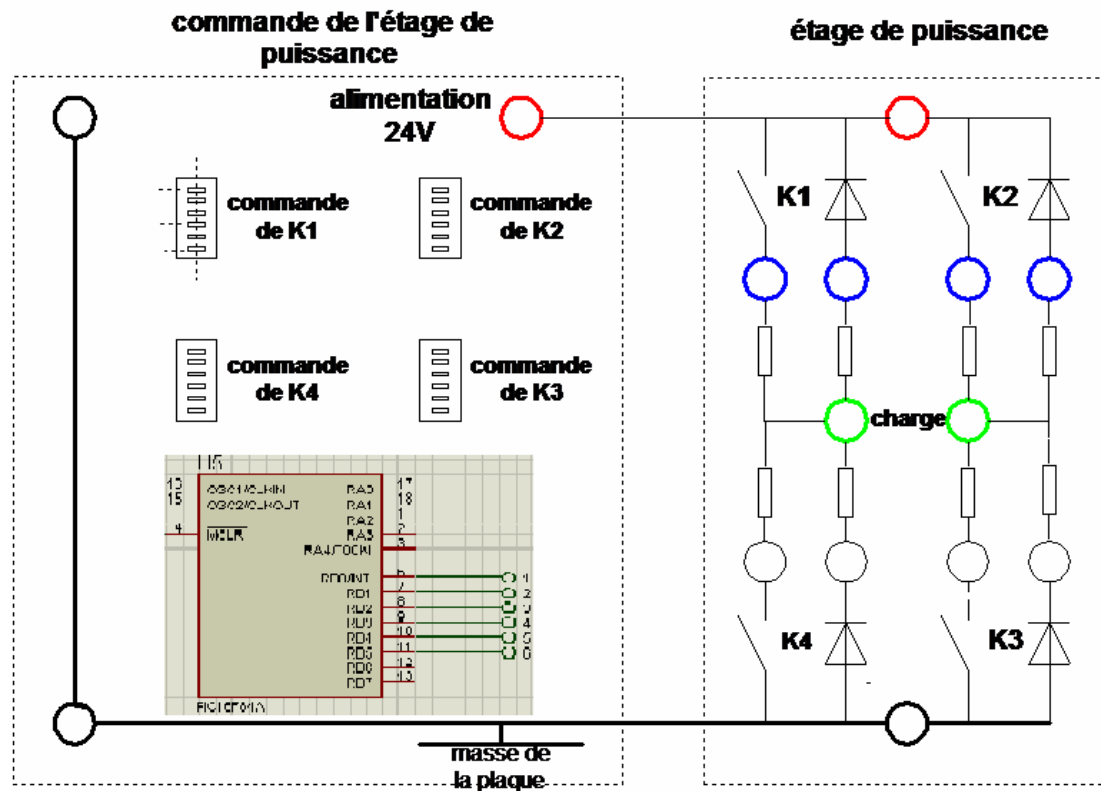


Figure III-9 : Etage de puissance et commande de la plaque

Les résistances de visualisation des courants, présentes sur le schéma sont des résistances de 1,2 (dissipant 1W).

III-8 Maquette :

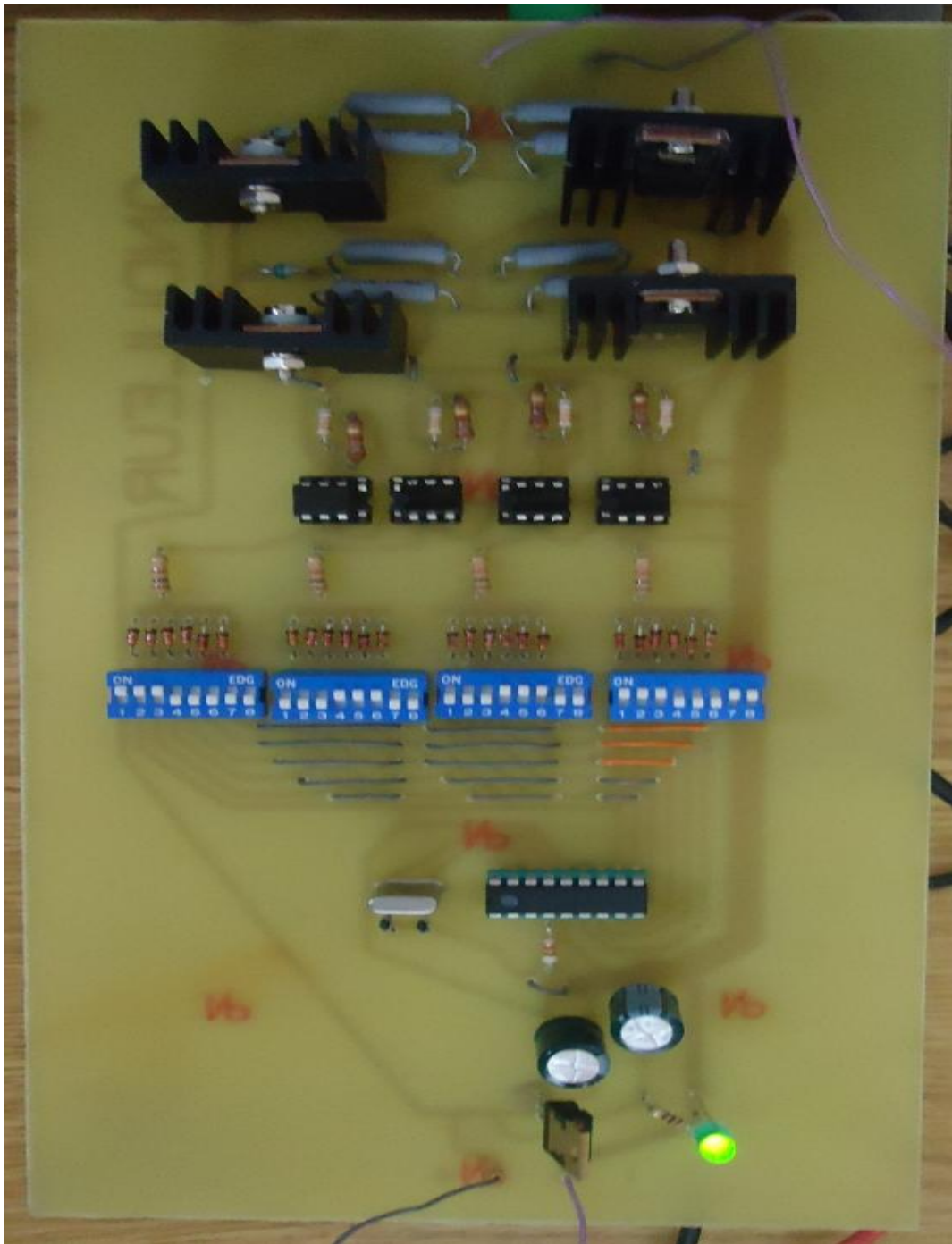


Figure III-10 Maquette de l'onduleur réalisé [55]

III-8-1 Commande de la maquette :

III-8-1-1 Décomposition du signal :

Remarque

Pour des raisons de clarté, les liaisons entre le compteur et les switchs n'ont pas été matérialisées mais sont repérées par des numéros. De plus les tensions V_1 , V_2 , V_3 , V_4 correspondent aux tensions appliquées sur les optocoupleurs de l'étage de puissance.

La période doit être décomposée en six intervalles de même durée. Un pic 16F84A a rempli cette fonction. Ce circuit intégré est un compteur.

Les sorties RB_0, \dots, RB_5 sont reliées à chaque switch et correspondent aux chronogrammes suivant :

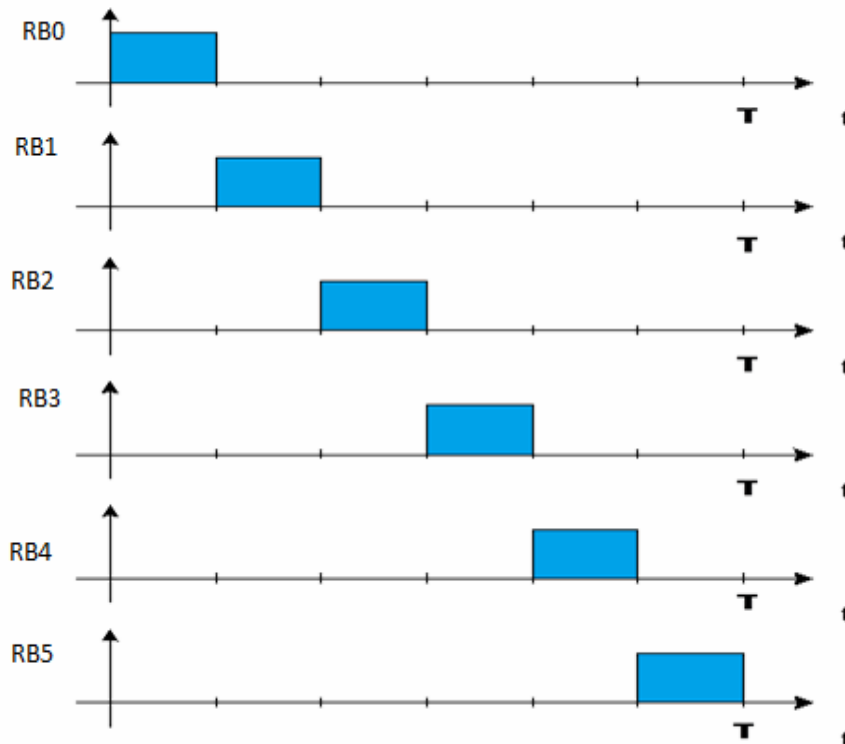


Figure III-11 Chronogrammes des sorties RB_0, \dots, RB_5

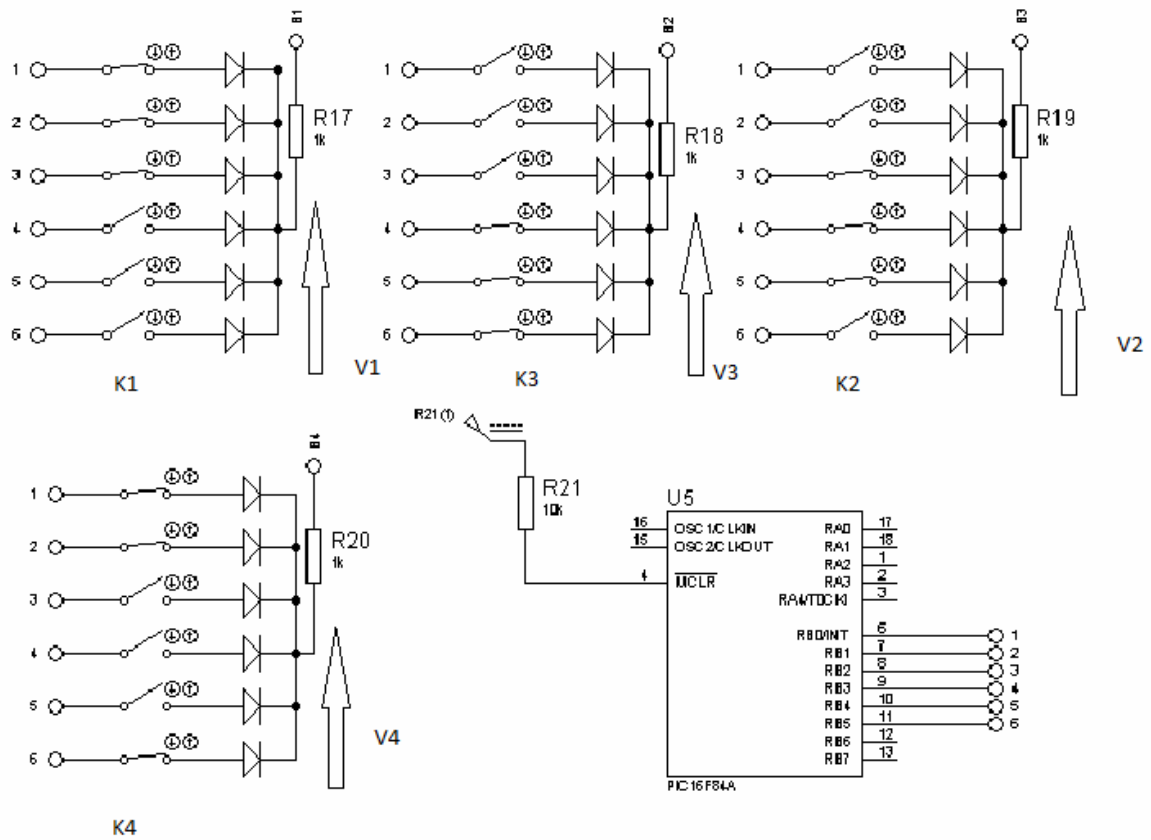


Figure III-12 Commande de la maquette

- Si seul le commutateur 1 est fermé, il est facile de comprendre que V1 aura la même allure que RB0. Si les commutateurs 5 et 6 sont fermés, alors V1 aura l'allure suivante:

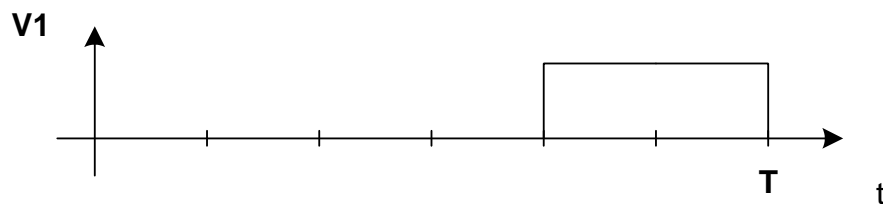


Figure III-13 Allure de V1

- A chaque commutateur fermé supplémentaire, on modifie la forme de la tension aux bornes des quatre switches.

Il est donc possible de commander chaque interrupteur par sixième de période et un à un. (rappelons que la tension V_n commande l'optocoupleur gérant l'interrupteur K_n).

III-8-1-2 Régulateur [30]:

Le régulateur **LM 7805** alimente uniquement la partie commande qui comporte des circuits intégrés fonctionnant sous des tensions de 5 V. le câblage est classique, le condensateur stabilise la tension et évite les problèmes de parasite.

III-8-1-3 PIC 16F84A :

Un microcontrôleur le plus simple qu'il soit, possède au minimum les éléments suivants :

- ✓ Une unité centrale qui est le cœur du système, également appelé CPU pour Central Processing Unit, dans cette unité centrale nous retrouverons plusieurs éléments telle que l'unité arithmétique et logique (UAL).
- ✓ Une mémoire contenant le programme à exécuter par le microcontrôleur, généralement appelée mémoire morte ou ROM (ReadOnly Memory), mémoire à lecture seule. Cette mémoire a la particularité de sauvegarder en permanence les informations qu'elle contient, même en absence de tension (ce qui est primordiale, sinon il faudrait reprogrammer le microcontrôleur à chaque remise sous tension).
- ✓ Un port d'entrées - sorties permettant au microcontrôleur de dialoguer avec l'extérieur pour par exemple prendre l'état d'un capteur , d'un interrupteur ou bien pour allumer une led ou piloter un relais (via un transistor bien sûr).
- ✓ Des bus internes permettent la communication entre les différents éléments intégrés au microcontrôleur. Il existe trois sortes de bus que l'on détaillera dans un prochain cours.

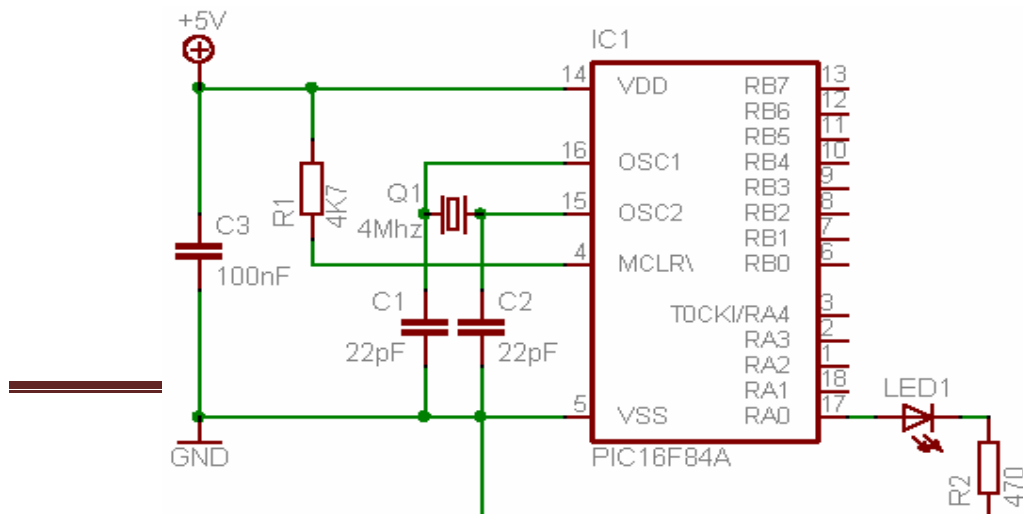


Figure III-14 PIC 16F84A

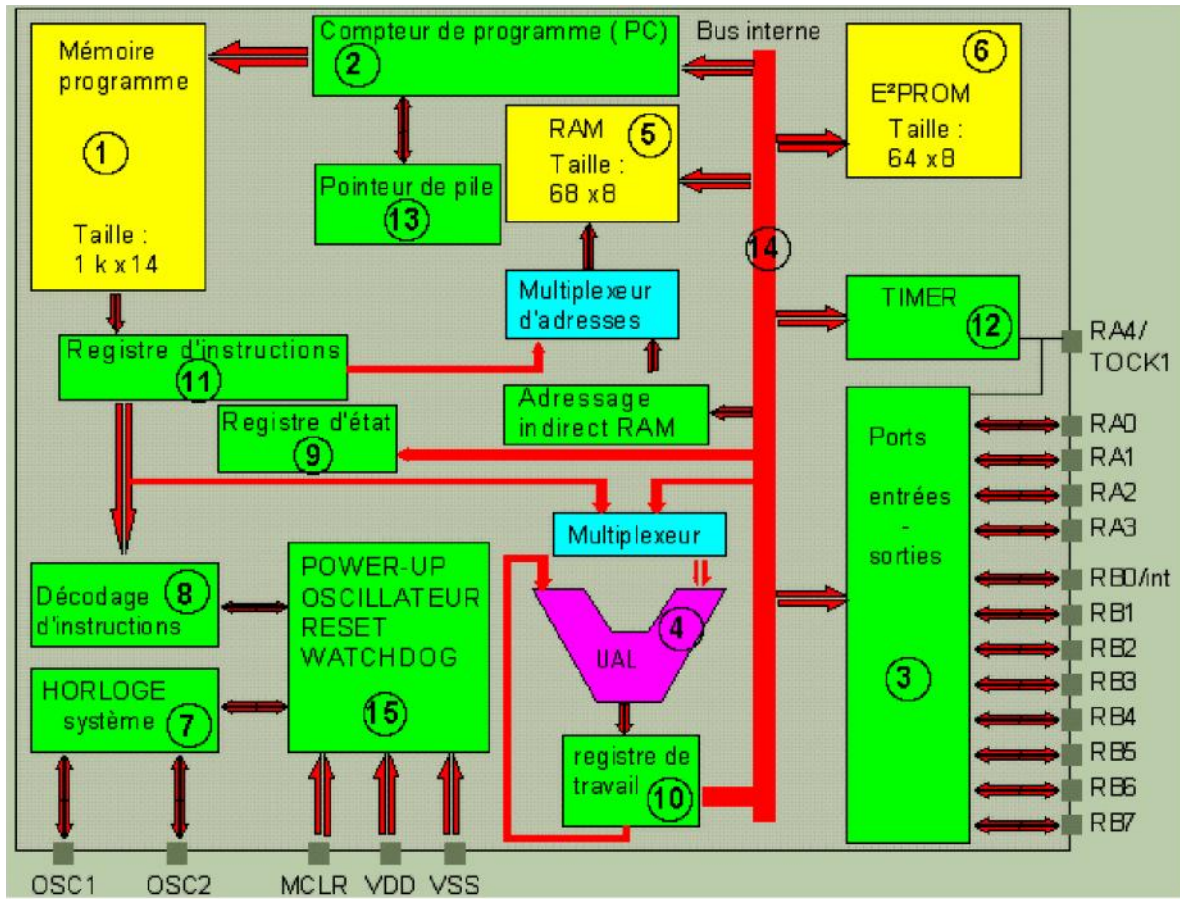


Figure III-15 : Architecture interne simplifiée du PIC 16F84A

III-8-2 Etage de puissance :

III-8-2-1 Interrupteurs commandés :

Les transistors bipolaires ont donc été conservés et le choix s'est porté vers le **TIP 122(NPN)** et le **TIP 127 (PNP)**.

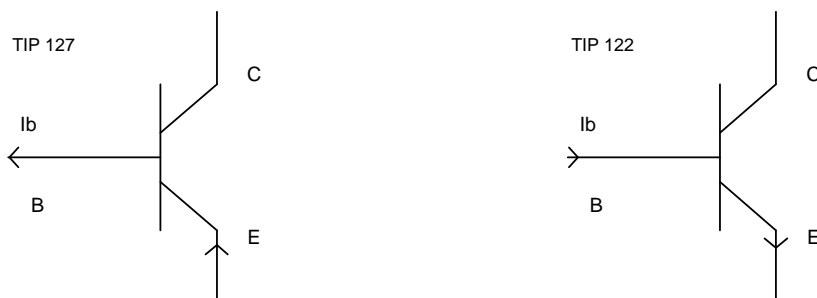
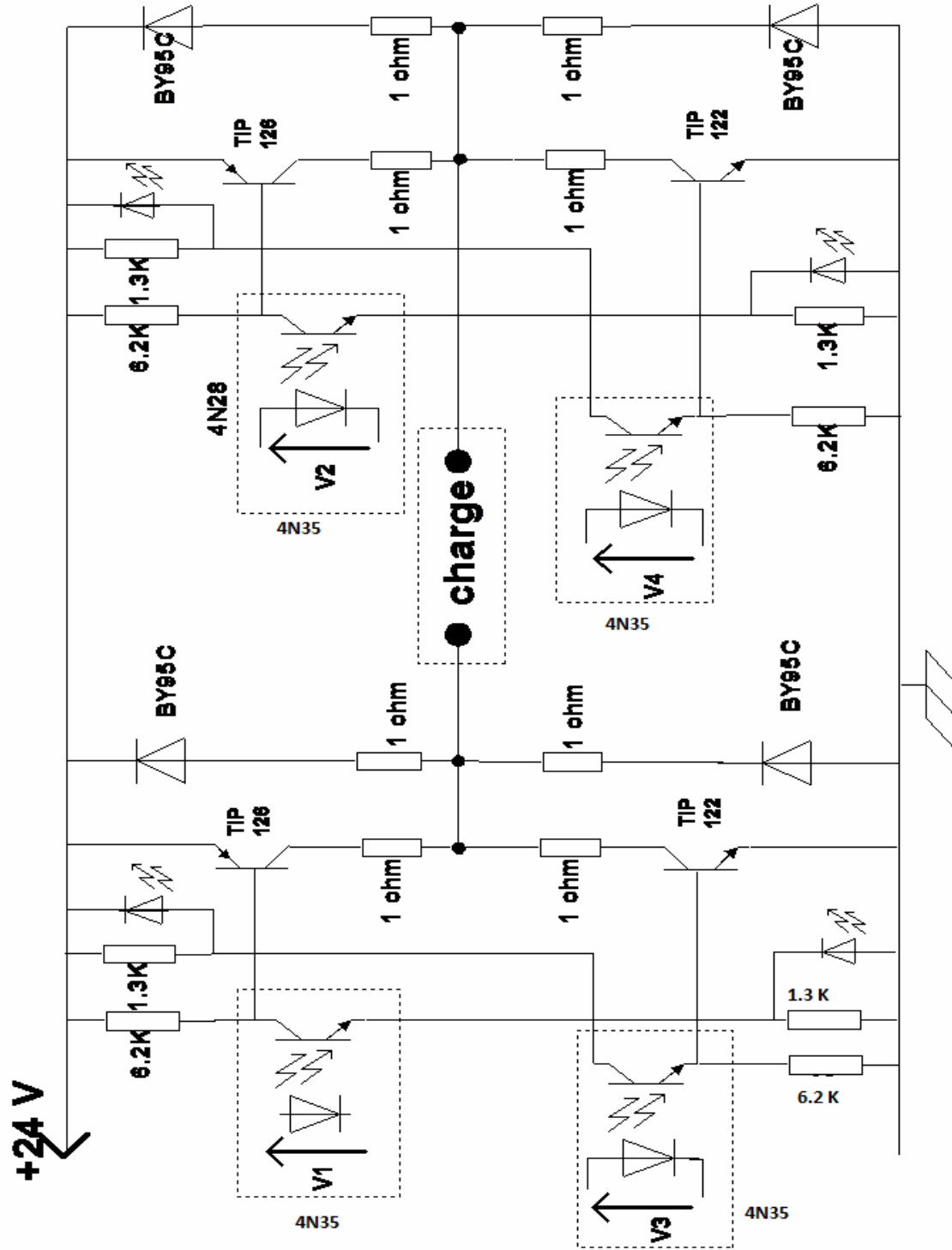


Figure III-16 : Symbole de transistors



Ce lien est matérialisé par les optocoupleurs **4N35**. Ils sont composés d'une diode électroluminescente et d'un phototransistor. Quand la diode est passante, l'intensité lumineuse produite sature le phototransistor qui est alors commandé à la fermeture : ainsi la tension entre collecteur et émetteur est quasiment nulle.

III-8-3-1 Fonctionnement :

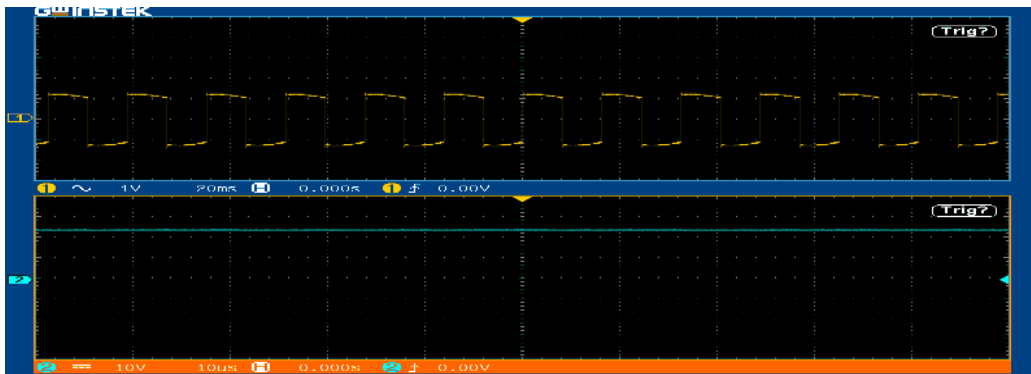
Le fonctionnement de l'étage de puissance dépend de la commande et de la charge.

Il dépend de la commande car les interrupteurs sont pilotés par les optocoupleurs eux-mêmes pilotés par les tensions auxquelles ils sont soumis. Nous décidons donc de la manière dont le pont fonctionne.

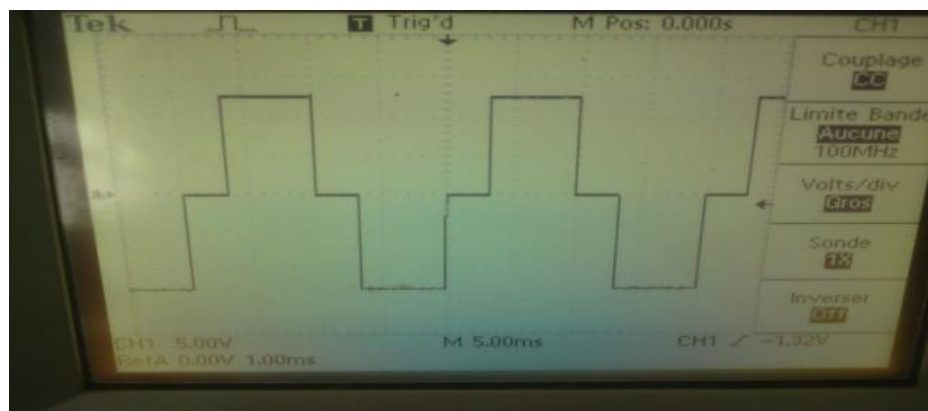
Ensuite, la charge impose la forme du courant circulant dans l'étage de puissance. Ce qui peut rendre, cela a déjà été dit, les transistors non passants bien qu'ils soient commandés à la fermeture.

III-9 Essais de l'onduleur réalisé [55]

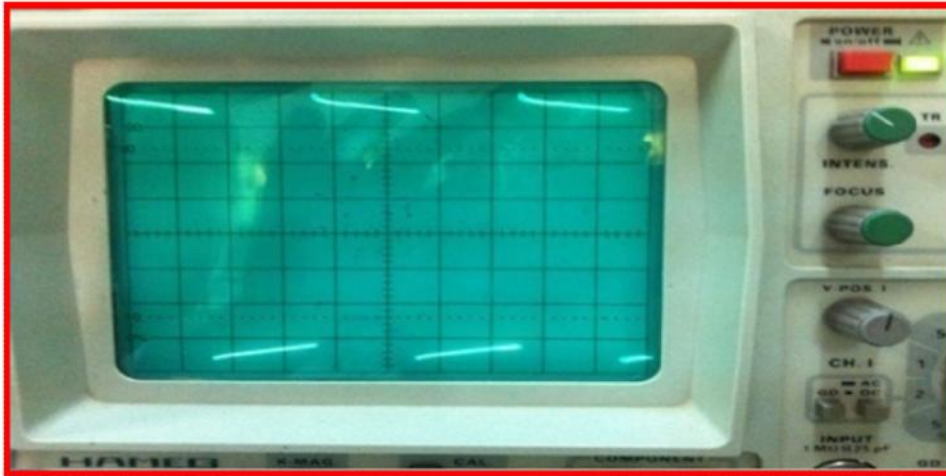
a) Commande symétrique charge résistive signal de la tension



b) Commande asymétrique charge résistive signal de la tension



c) **Commande symétrique pour une charge RL : signal de la tension**



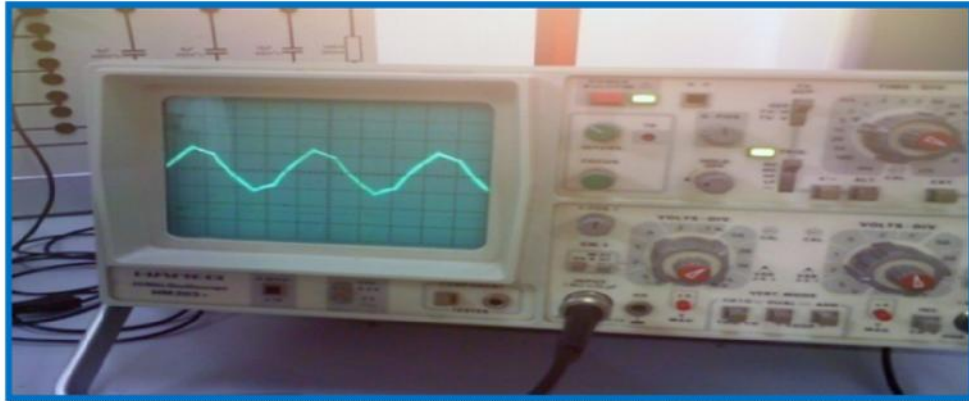
d) **Commande symétrique pour une charge RL Courant dans la charge**



e) **Commande asymétrique : Tension aux bornes d'une charge RL**



f) **Commande asymétrique : Courant dans une charge RL**



III-9 Conclusion :

L'onduleur joue un rôle très important dans la conversion photovoltaïque. Son principal rôle est la conversion continue-alternative.

La commande symétrique donne une tension de type carré alternatif. La commande décalée offre la possibilité d'avoir un signal de type escalier.

Pour une charge inductive le courant est de forme quasi-sinusoidale.

Actuellement on peut minimiser le poids des onduleurs en évitant les transformateurs en fer. Il y'a beaucoup de recherches orientées vers les transformateurs ferrites haute fréquence.

D'autres possibilités de réduire le poids des transformateurs ainsi que les distorsions du signal causées par les harmoniques sont offertes par les hacheurs types boot et Sepic.

L'optimisation de l'énergie produite par les panneaux PV surtout par temps nuageux devient une nécessité absolue de nos jours. La méthode des plans d'expérience offre la possibilité d'optimiser les paramètres de position du générateur. Ce travail fera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre IV Plan d'expérience pour générateur photovoltaïque

Introduction :

Ce chapitre est dédié à la présentation des réalisations expérimentales et méthodes spécifiques utilisés pour la réalisation d'un générateur photovoltaïque et leur développement et exploitation pour alimenter un système de production d'ozone utilisé pour traitement des eaux.[55]

En premier lieu, et après avoir étudié la conversion de l'énergie photovoltaïque et les diverses structures mécaniques possibles, nous présenterons, tout ce qui concerne la réalisation du générateur PV pour mettre en avant une étude approfondie sur la puissance crête de ce GPV. En deuxième temps, nous proposons une méthode expérimentale (la méthodologie de plan d'expérience) pour modéliser ce système solaire afin d'obtenir le point de fonctionnement optimal concernant l'orientation de panneau solaire lors de passage des nuages qui diminue la valeur d'ensoleillement jusqu'à 450 lux et qui minimise la production d'ozone si l'énergie produite par le système solaire est inférieure à 65 watt.

IV.1 Réalisation d'un GPV:

La réalisation est composée de deux parties :

- Partie mécanique
- Partie électrique

IV.1.1 Partie mécanique :

Pour que la production photovoltaïque soit maximale, les rayons provenant directement du soleil doivent avoir un angle d'incidence égal à 90° . Le pointage du panneau est donc optimal lorsque la normale au plan du panneau, en son centre, est dirigée vers le soleil

IV.1.1.1 Description de la structure



Figure 4.1 : Structure mécanique réalisée

La structure mécanique est constituée de deux parties mobiles. Une partie sur l'axe horizontal pour la variation d'élévation du panneau par rapport au soleil et l'autre partie sur l'axe verticale pour la variation d'azimut du panneau.

IV.1.1.2 Orientation à l'axe horizon (élévation) :

La variation d'élévation est basée sur un vérin électrique



Figure 4.2 : Vérin du contrôle d'élévation

L'élévation minimale du soleil est obtenue à son lever et à son coucher et égale à 0° (Horizon). L'élévation maximale du soleil est fonction de la latitude du lieu d'installation. En fait, dans la configuration d'origine, les fins de course du vérin d'élévation sont réglées par rapport à l'élévation max et min du soleil.

- Élévation min du panneau = 10° latitude du lieu (Sidi Bel Abbés = 35.11°) lorsque la tige du vérin est complètement sortie.
- Élévation max du panneau = 90° lorsque la tige du vérin est complètement rentrée.

IV.1.1.3 Orientation de l'axe vertical (l'azimute) :



Figure 4.5 : Moteur de contrôle d'azimut

Le mouvement en axe d'azimut est en un angle de 180° . Au matin de -90° à 0° et l'après-midi de 0° à 90° . Il faut orienter le milieu de l'angle de mouvement sur l'axe vertical vers le sud où l'azimut = 0° . L'emplacement de la fin de course est à -90° et $+90^\circ$ du point milieu.

IV.2 Choix du moteur électrique:

Nous avons choisi un vérin électrique à base du moteur DC pour l'axe horizontal à cause du poids du panneau et en axe vertical un moteur DC réducteur avec une Poulie et Courroie grâce à sa très simple commande.

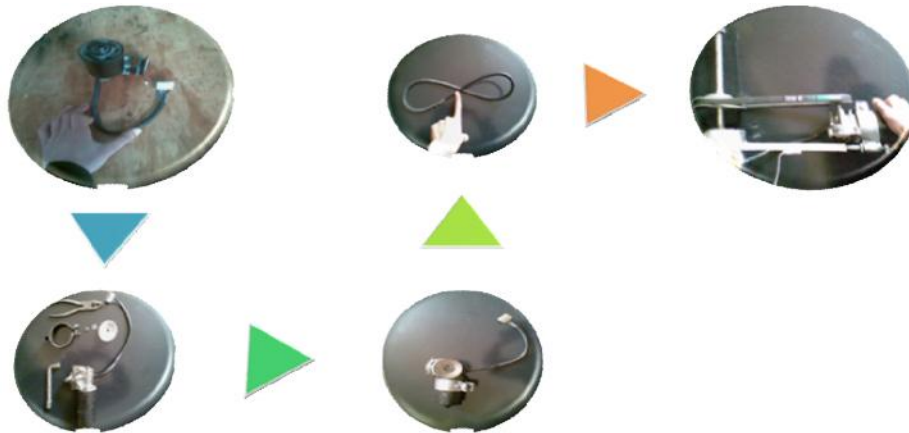


Figure 4.6 : Etapes pour placer le moteur de contrôle d'azimut

IV.2.1 Vérins électriques :

Les vérins électriques utilisent le principe de la transformation d'un mouvement de rotation créé par un moteur électrique en un mouvement de translation grâce à un système mécanique de transformation de mouvement voir figure (4.7). La vitesse linéaire de la tige du vérin dépend donc de la vitesse de rotation du moteur et du pas du système de transformation de mouvement. La force d'entrée et de sortie de la tige est très importante.

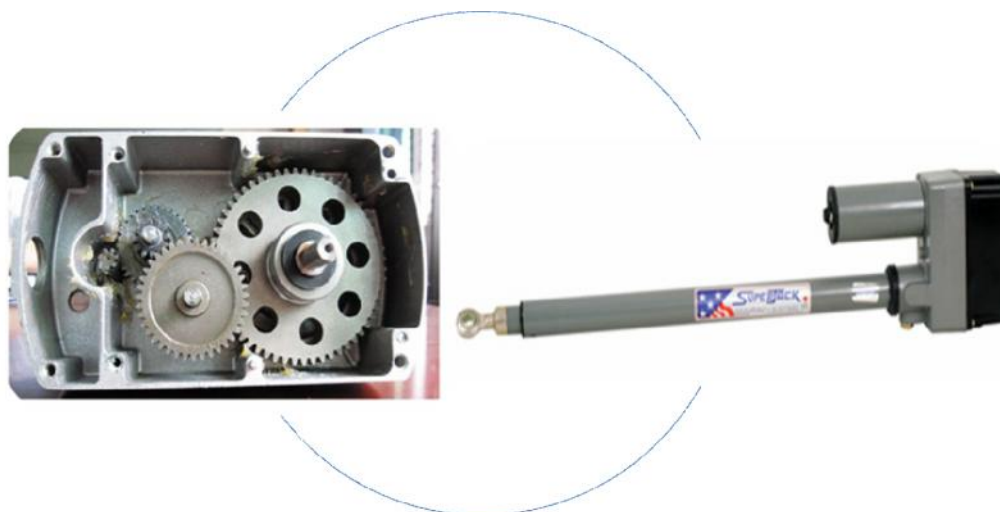


Figure 4.7 : Vérin électrique et son système mécanique de transformation de mouvement

IV.2.2 Schéma cinématique

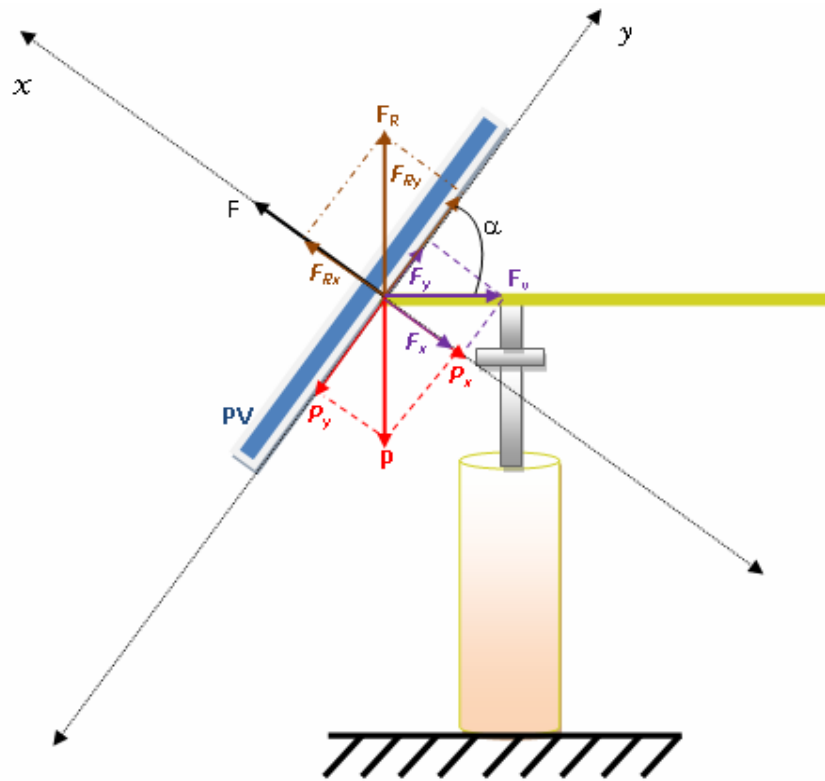


Figure 4.8 : Schéma cinématique d'un panneau photovoltaïque

IV.2.3 Présentation

La figure (4.8) représente le schéma cinématique simplifié du mécanisme d'entraînement de panneaux photovoltaïques mobile. Les principaux éléments de l'ensemble sont :

- support fixe
- panneaux photovoltaïques (PV)
- vérin électrique (VE)
- moteur CC (M)

IV.2.3.1 Principe de fonctionnement

La rotation imposée par le moteur (M) est transmise par l'intermédiaire de la courroie « entre deux Poulie » à l'axe du support. La rotation de l'axe fait tourner le cadre qui lui supporte le panneau (PV). Cette action provoque la rotation EST/OUEST, le cadre est placé sur sa base par des paumelles qui donnent un équilibre et un mouvement libre. La tige de (VE) est

raccordée avec le cadre par un boulon. Donc la translation de la tige impose le degré d'inclinaison du cadre.

IV.2.3.2 Etude mécanique

Afin de calculer la vitesse de rotation du panneau, nous avons besoin de déterminer la longueur d'une journée c'est-à-dire le nombre d'heures à partir du lever du soleil jusqu'à son coucher. Ce nombre est égal à 14 heures en été et à 9 heures en hiver. Ainsi, nous avons pris la moyenne qui est égale à 12h. Cette valeur sera utilisée dans les calculs qui suivent.

$$\omega_{pan} = \frac{180^\circ}{12_h} = \frac{\Pi}{12 \times 3600} \quad (4.1)$$

Avec (ω_{pan} : Vitesse de rotation du panneau)

$$\omega_{pan} = 7.27 \cdot 10^{-5} \text{ rad/s}$$

$$\omega_{pan} = 15 \text{ deg/h}$$

Les actions mécaniques extérieures appliquées au panneau sont :

- \vec{P} : Poids des deux panneaux.
- \vec{F}_v : L'effort exercé par le vent.
- \vec{F} : L'effort exercé par le vérin.

D'après le principe fondamental de la statique on a :

$$\sum \vec{F}_{ext} = \vec{0} \quad \Rightarrow \vec{P} + \vec{F} + \vec{F}_v = \vec{0} \quad \Rightarrow \vec{F} = -(\vec{P} + \vec{F}_v) \quad (4.2)$$

$$\vec{P} = m \times \vec{g}$$

$$\vec{P} = 12 \times 10 \quad (4.3)$$

$$\vec{P} = 120N$$

On a estimé que l'effort exercé par le vent sur le PV est de 10 N pour une vitesse moyenne de 6,11m/s.

$$\vec{F} = \vec{P} + \vec{F}_v \quad (4.4)$$

$$\vec{F} = 120 + 10 = 130N$$

IV.2.3.3 Dessin du support mécanique

Pour cette partie nous avons dimensionné le support mécanique qui convient à notre panneau solaire. On utilise seulement le logiciel ZW3D pour dessiner les différentes parties mécaniques du support.

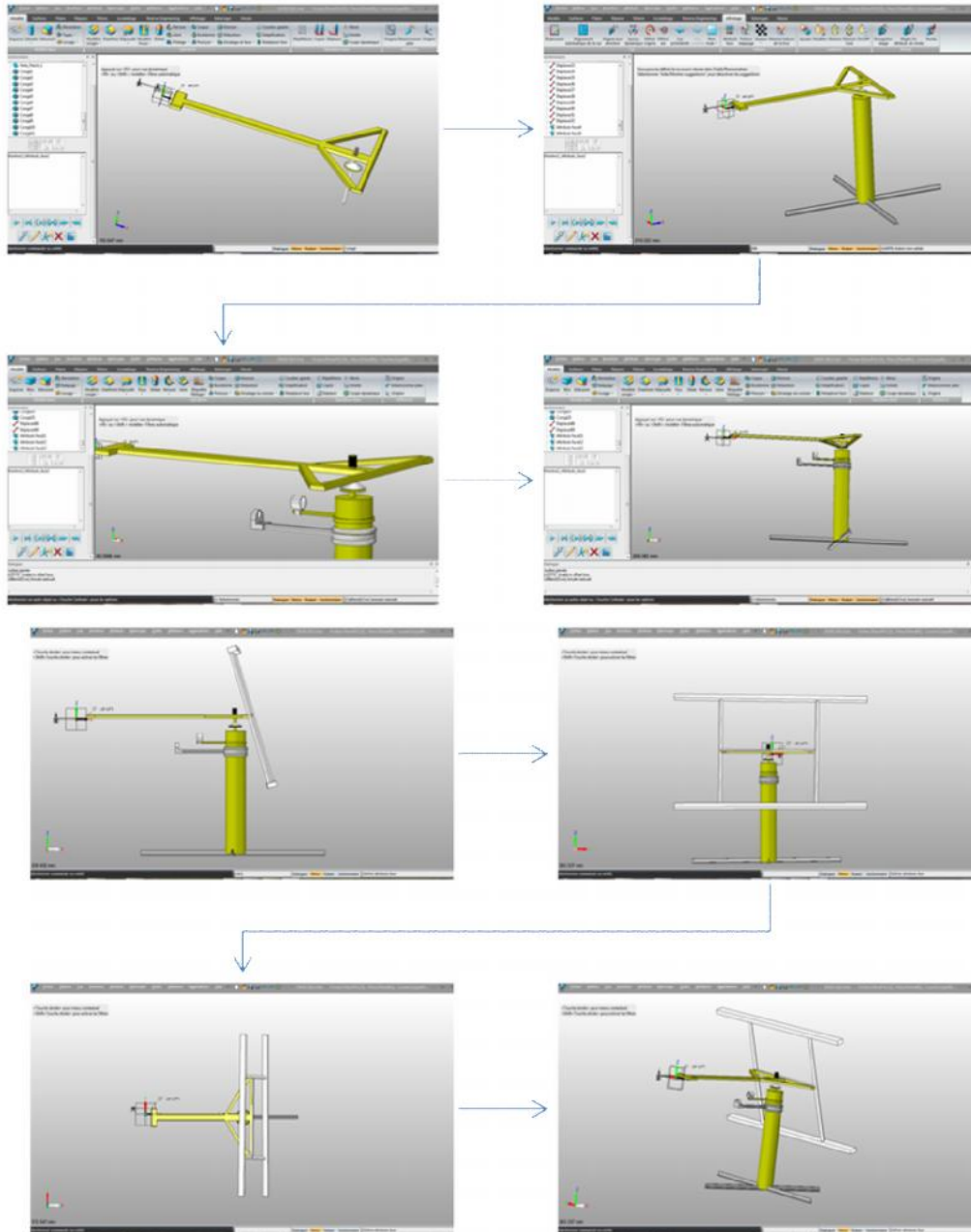


Figure 4.9: Différentes fenêtres ZW3D pour dessiner les différentes parties mécaniques du support.

IV.3 Partie électrique:

a) Montage du générateur photovoltaïque

Dans cette partie, le générateur photovoltaïque est monté comme s'il était sur un toit plat. On place d'abord les supports, alignés et orientés vers le sud. Ensuite, les diodes sont branchées dans les boîtiers de connexion des modules. Les modules sont alors montés sur leur structure de support. Lors du câblage, il faut veiller à ce que les câbles pénètrent dans les boîtiers de connexion par le bas. Ils seront ensuite placés sur des chemins de câbles posés sur le sol. La structure de support doit être mise à la terre.



Figure 4.10 : Structure de support

b) Raccordement de régulateur photovoltaïque

Le régulateur contient deux pôles : positive (+) et négative (-) pour le panneau et autre pour la batterie, aussi un autre pour les charges à courant continuil faut respecter les signes positifs et négatifs pour éviter l'erreur de mesure et protéger le régulateur



Figure 4.11 : Régulateur Photovoltaïque Steca 2020 12/24V 20A

c) Raccordement de la batterie

La batterie est un dispositif qui fournit (restitue) de l'énergie électrique après avoir été stockée sous forme d'énergie chimique, ce sont des générateurs électrochimiques.

Elles sont constituées de deux électrodes, plaques positif (anodes) et plaques négatif (cathode) immergées dans un électrolyte.

L'anode est réducteur qui sera oxydée pour générer des électrons et la cathode est oxydant qui sera réduit en captant des électrons, l'électrolyte a pour rôle d'assurer le bon déplacement des ions (électrons). Donc c'est l'accumulation et la restitution dues à la réaction d'oxydoréduction (redox), qui gère le transfert d'ions entre les électrodes.

Dans une batterie, l'accumulation est désignée par la charge et la restitution d'énergie par la décharge.



Figure 4.12 : Batterie Isofoton 12V 80Ah

A partir de régulateur on connecte la borne positive avec l'anode de la batterie et la borne négative avec la cathode de la batterie.

➤ Entretien des batteries:

Il n'y a que quelques règles simples à respecter :

- Ne pas les surcharger
- Ne pas les laisser déchargées
- Combattre ou éviter la sulfatation

- Avoir toujours suffisamment d'électrolyte

d) Raccordement de l'onduleur photovoltaïque

Toujours à partir de régulateur les pôles de la charge CC sont raccordés directement à l'onduleur.



Figure 4.13 : Onduleur photovoltaïque 10.5-15V 750VA

1. Essai

L'installation montée et mise en service peut encore faire l'objet d'essais d'ombrage et de son influence sur le rendement. Il faut toutefois remarquer que le générateur photovoltaïque monté est de faible puissance et que les puissances nécessaires au fonctionnement ne seront atteintes qu'à la condition que le rayonnement solaire soit suffisant.



Figure 4.14 : Montage électrique avec une charge AC

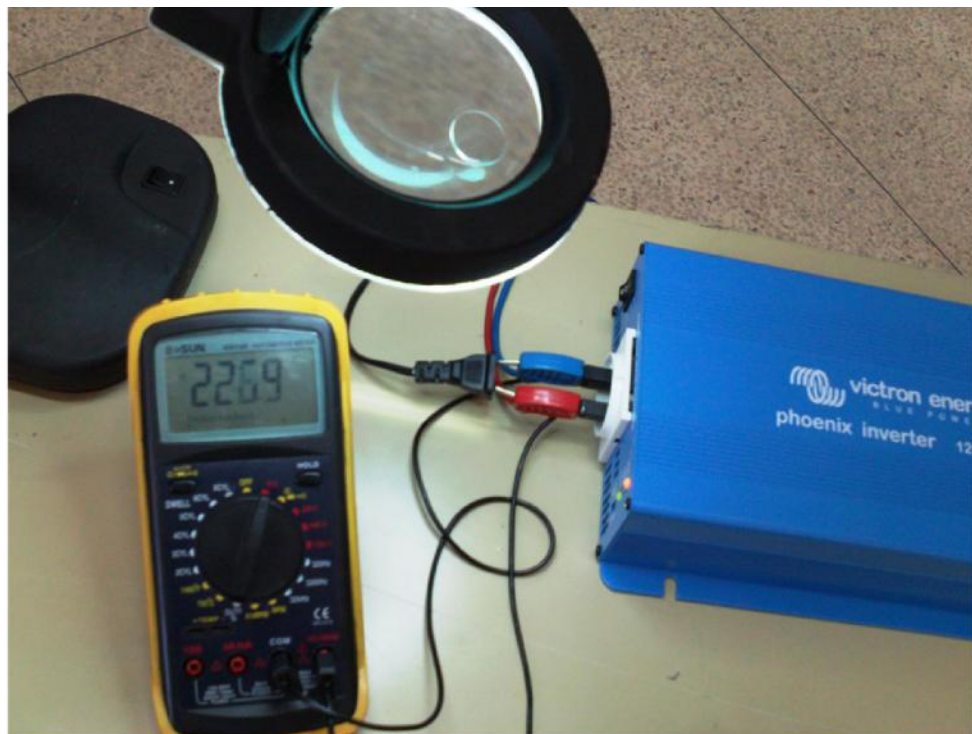


Figure 4.15 : Tension aux bornes de la charge 226.9V

b. Procès-verbal de mesures

Mesures du module

Données techniques du module:

Type de module	<i>STP 135-12/TB</i>
Tension au MPP	17.5 V
Courant au MPP	7.71 A
Puissance maximale P	135 W
Tension à vide U_0	22.3 V
Courant de court-circuit I_{cc}	8.2 A
Facteur de forme FF	0.75
Surface des modules A	0.876 m ²

Eclairement nominal 1000 W/m²

$$\text{Rendement} = \frac{\text{Puissance maximale}}{1000 \times A} \times 100 = \frac{135}{1000 \times 0.876} \times 100 = 15.41 \% \quad (4.5)$$

Mesures /calculs:

Tension à vide U_{0m}	21.4 V
Courant de court-circuit I_{cm}	7.5 A

Puissance

$$P_m = FF \times U_{0m} \times I_{cm} = 21.4 \times 7.5 \times 0.75 = 120.375 \text{ W} \quad (4.6)$$

Rayonnement I_M (mesuré au solarimètre) 800 W/m²

Vérification du rendement ():

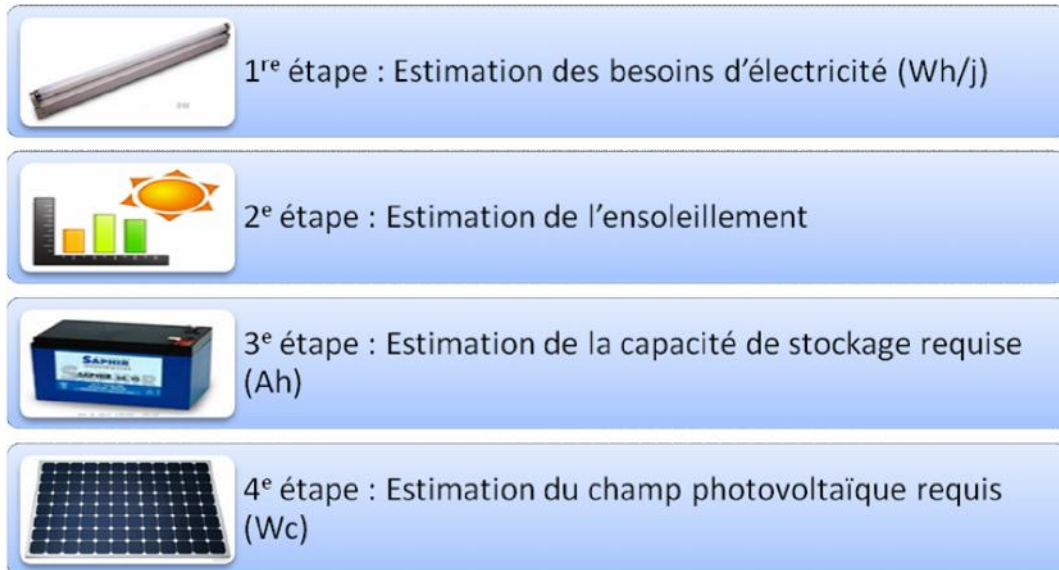
$$\eta = \frac{\text{Puissance mesurée } P_m}{\text{Rayonnement mesuré } I_m \times A} \times 100 = 120. \frac{375}{800 \times 0.876} \times 100 = 17.17 \% \quad (4.7)$$

c) DIMENSIONNEMENT D'UN SYSTÈME PV AVEC BATTERIE

Le dimensionnement a pour but de déterminer la puissance-crête du générateur solaire et la capacité de la batterie, à partir des données d'ensoleillement du site d'une part, et des besoins électriques de l'utilisateur d'autre part. Le choix des composants du système solaire doit permettre à l'utilisateur d'utiliser les équipements requis durant la période demandée, et ce avec une disponibilité prédéterminée.

Les étapes suivantes permettront de dimensionner approximativement un système photovoltaïque. Il faut, en premier lieu, estimer les besoins en électricité et établir la durée de

la période d'ensoleillement minimale de la région où le système sera installé. Les grilles de calculs ci-après permettront ensuite de dimensionner la capacité de la batterie et la puissance du champ photovoltaïque. Afin de faciliter les calculs préliminaires, nous avons indiqué les rendements typiques des régulateurs de charge et des batteries. Ces valeurs devront être réajustées lorsque le choix des composants du système aura été arrêté et qu'une meilleure estimation de l'efficacité du système et du rendement des composantes sera possible.



i. 1^{re} étape : Estimation des besoins d'électricité (Wh/j)

Appareil/ Charge	CC/CA	(A) Puissance nominale (W)	(B) Heures d'utilisation journalière	Consommation électrique journalière en Wh/j A × B
ÉCLAIRAGE tubes fluorescents	CA	8	10	80

Les charges CA doivent tenir compte des pertes dues à l'onduleur. Ce rendement se situe entre 80 % et 95 % (0,80 et 0,95) pour les petits onduleurs électroniques (100 à 4 000 W) :

$$\text{Charges CA rectifiées} = \frac{\text{Charges CA}}{\text{Ren}_{ca}} = \frac{80}{0.85} \text{Wh/j} = 94 \text{Wh/j} \quad (4.8)$$

Estimation de l'onduleur = 100 W (A)

Charge journalière totale :

Charges CC + Charges CA rectifiées = 94 Wh/j

ii. 2e étape : Estimation de l'ensoleillement

Consulter la carte d'ensoleillement de la région. Toujours choisir la période de l'année la moins ensoleillée afin d'obtenir la production d'électricité requise durant cette période.

L'ensoleillement est habituellement exprimé en kWh/m²/j ou en heures de plein ensoleillement (heures.1000 W/m²).

Ensoleillement: 4 à 6 heures/j (kWh/m²/j)

iii. 3e étape : Estimation de la capacité de stockage requise (Ah)

Rendement du générateur photovoltaïque :

Regen: 15 %

(Pertes dues à la poussière, à l'échauffement des modules, au câblage, etc.,)

Rendement d'une batterie d'accumulateurs :

Renacc : 75%

(Typiquement de 75 % à 90 %, inclure les pertes de câblage et de vieillissement)

Tension nominale des accumulateurs : (12 V, 24 V, 48 V, etc.)

V acc : 12 Vcc

Décharge maximale des accumulateurs :

DM: 80 % (Entre 20 % et 80 % de décharge)

Nombre de jours de stockage :

Jr aut : 3 j (En général, on prévoit trois à cinq jours d'autonomie).

Pour un système dont la disponibilité est critique, il faut indiquer une autonomie plus élevée.

Capacité des accumulateurs (Ah) =

$$\frac{\text{Charge journalière} \times \text{Jr}_{\text{aut}}}{V_{\text{acc}} \times \text{Ren}_{\text{acc}} \times \text{DM}} = \frac{94 \times 3}{12 \times 0.75 \times 0.8} = 39 \text{ Ah} \quad (4.9)$$

iv. 4e étape : Estimation du champ photovoltaïque requis (Wc)

Puissance du champ Photovoltaïque (Wc) =

$$\frac{\text{Charge journalière}}{\text{ensoleillement} \times \text{Ren}_{acc} \times \text{Ren}_{gen}} = \frac{94}{4.6 \times 0.75 \times 0.15} = 181.6 \text{ W} \quad (4.10)$$

b. Expérimentation du système

i. Expérimenter la performance de panneau PV

Dans le premier essai, nous avons fixé le panneau vers le sud, avec un degré d'inclinaison de 45°

A partir de relevés de courant et tension du système autonome photovoltaïque, on calcule la puissance du panneau. De ce calcul on trace l'histogramme de puissance suivant.

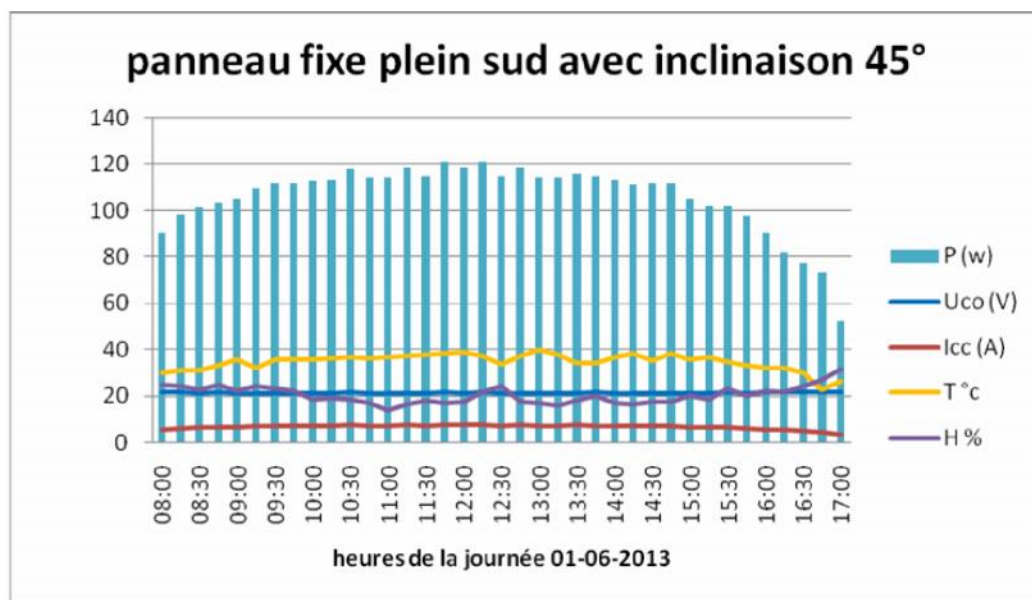


Figure 4.16: Puissance du PV

D'après l'histogramme on remarque que la puissance augmente avec le temps jusqu'à atteindre le maximum de 12 heures à 13 heures puis elle diminue. On remarque la même chose pour le courant, la tension ne change presque pas

ii. Inclinaison du panneau solaire photovoltaïque

Dans le deuxième essai, nous avons incliné le panneau solaire photovoltaïque selon plusieurs angles d'inclinaison (55°,50°,45°,35°) pour avoir une puissance maximale. La

figure 4.17 représente le meilleur angle d'inclinaison pour lequel la puissance est maximale (cet angle est égal à 45°).

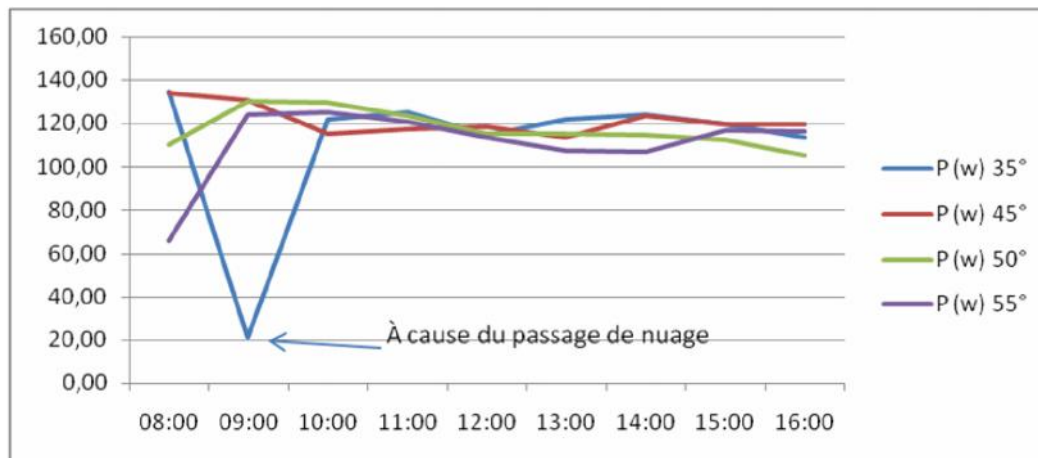


Figure 4.17: Influence de l'inclinaison sur la puissance

Application du générateur solaire photovoltaïque pour alimenter le générateur d'ozone :

Cette partie est consacrée à l'application du système photovoltaïque pour alimenter un générateur d'ozone exploité pour le traitement des eaux. Le dispositif expérimentale à étudier représenté aux figures 4.18.a et 4.18.b est un système autonome. Son élément essentiel est la batterie qui sert à stocker l'énergie électrique. Ce système contient un module photovoltaïque (1) de 135W qui produit l'énergie électrique. Le régulateur (2) 12/24V 20A, régule la tension du panneau à 12V. Une batterie solaire (3) de 80Ah sert au stockage de l'énergie. L'onduleur (4) de 10.5-15V et 750W, convertie la tension continue en une tension alternative. Une source haute tension haute fréquence (5) transforme la tension de fréquence 50Hz à une haute fréquence. Le générateur d'ozone (6) crée une décharge à barrière diélectrique générant l'ozone.

L'eau à traiter (7) est mise en mouvement à l'aide d'une pompe à eau (8), un système de type Venturi (9) permet l'injection de l'ozone produit par le réacteur à DBD dans le circuit d'eau, l'eau mélangée avec de l'ozone est introduit dans un autre réservoir (10).

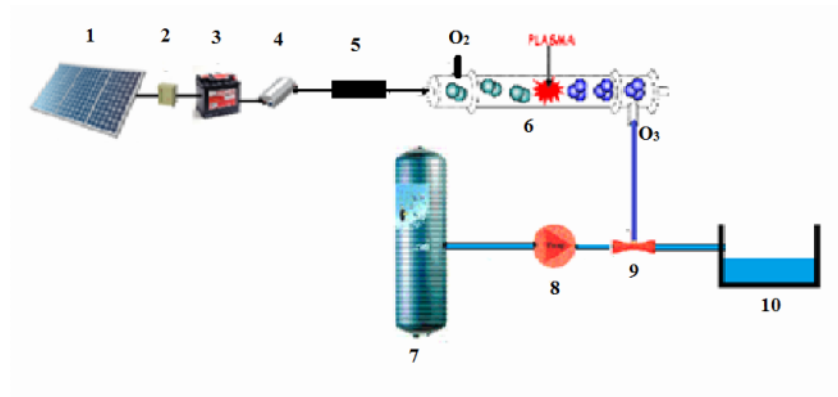


Figure 4.18.a: Schéma du générateur autonome photovoltaïque alimentant le générateur d'ozone.



Figure 4.18.b: Photo du Générateur autonome photovoltaïque alimentant le générateur d'ozone

IV.3 Plans d'expérience appliquée au système solaire photovoltaïque [53, 55]

Pour fonctionner au maximum de ses capacités, un panneau doit être perpendiculaire aux rayons du soleil [31]. Cependant, l'orientation du soleil par rapport à la terre varie en fonction des saisons et du moment de la journée [32]. Il n'est donc pas possible d'avoir une installation optimale de façon permanente (à l'exception des dispositifs de suivi automatique qui sont rarement utilisés pour des toitures solaires compte tenu de leur coût).

Par contre, il est possible d'obtenir une moyenne, qui permettra d'optimiser le plus longtemps possible la production électrique [32]. Le positionnement idéal d'un panneau est alors d'être orienté plein sud (correspondant au zéro de l'angle Est-Ouest), avec une inclinaison variant de 40° à 50° [33].

Plusieurs travaux ont été développés ces dernières années concernant : la modélisation la caractérisation et l'exploitation optimale des panneaux solaires [34-40].

En Algérie, comme l'automne est caractérisé par le passage de nuages presque quotidiennement et qui influe négativement sur le rendement de panneau solaire, l'objectif est l'identification du point optimal de fonctionnement et évaluation de la robustesse de cette installation lors de passage de nuages. Cela consiste à déterminer les valeurs optimales des angles d'orientations (sud-nord et est-ouest), afin de maximiser la puissance produite par le système solaire photovoltaïque. Trois plans d'expériences de type «plan composite à faces centrées», effectués sur un dispositif de laboratoire en fonction de ces facteurs, ont permis de modéliser le procédé et d'analyser les interactions entre les facteurs.

La méthodologie des plans d'expérience permet de déterminer le nombre d'expériences qui seront réalisées conformément à un objectif bien défini, afin d'étudier plusieurs facteurs simultanément, à réduire la dispersion associée à des mesures, d'apprécier les effets de couplage entre les facteurs et enfin d'évaluer les influences respectives des facteurs et leurs interactions. De nombreux articles ont été écrits sur l'application de cette méthodologie dans les processus électriques.

Quelques rappels sur le principe des plans d'expériences

a) Vocabulaire utilisé

1) . Réponses, facteurs, niveaux

Avant d'aborder le principe des plans d'expériences, il est important de préciser le vocabulaire utilisé.

Les phénomènes étudiés sont mis sous la forme mathématique suivante :

$$\mathbf{Y} = \mathbf{f}(\mathbf{U}_{ij}) \quad (4.11)$$

Où \mathbf{Y} , la grandeur à laquelle s'intéresse l'expérimentateur, est appelée **la réponse**,

\mathbf{U}_{ij} , les variables (naturelles) qui influencent un phénomène, sont appelées **les facteurs**.

\mathbf{f} est une fonction mathématique qui prédit les variations de la réponse selon les différentes valeurs données aux \mathbf{U}_{ij} : en principe il s'agit d'un polynôme du premier ou deuxième degré dans le cas des plans d'expériences.

Lorsque l'on étudie un facteur \mathbf{U}_{ij} , on définit toujours, en fonction des besoins de l'étude, une valeur inférieure et une valeur supérieure. Les variations du facteur sont donc limitées par deux bornes qui sont appelées **niveau bas** et **niveau haut**. On désigne le niveau bas (codé -1) par le signe (-) et le niveau haut (codé +1) par le signe (+).

2) . Variables codées

Pour pouvoir comparer entre eux les "poids" des paramètres, on préfère ne pas utiliser les valeurs des variables naturelles \mathbf{U}_{ij} qui dépendent des unités utilisées. Pour surmonter cette difficulté, on utilise les valeurs des **variables codées** \mathbf{X}_{ij} dont l'origine correspond au centre du domaine expérimental. Les valeurs des variables codées sont définies de la manière suivante :

$$\mathbf{X}_{ij} = (\mathbf{U}_{ij} - \mathbf{U}_j^0) / \Delta \mathbf{U}_j \quad (4.12)$$

avec \mathbf{X}_{ij} : valeur de la variable codée j pour l'expérience i ;

\mathbf{U}_{ij} : valeur de la variable naturelle j à l'expérience i ;

\mathbf{U}_j^0 : valeur de la variable naturelle au centre du domaine ;

$\Delta \mathbf{U}_j$: pas de variation de la variable naturelle j (moitié de l'écart entre la valeur maximum et la valeur minimum de la variable).

Trouver des modèles mathématiques de bonne qualité avec un minimum d'efforts dépend de la façon dont les intervalles des facteurs sont sélectionnés. Cette méthode peut être utilisée comme suit :

- ✓ Sélection des facteurs les plus intéressants et influents.
- ✓ Détermination des valeurs maximales, minimales et centrales de chaque facteur.
- ✓ Réalisation d'une matrice d'expériences avec tous les états possibles et les réponses correspondantes.

b) Notion de surface de réponse

Les niveaux x_i représentent les coordonnées d'un point expérimental et y est la valeur de la réponse en ce point. On définit un axe orthogonal à l'espace expérimental et on l'attribue à la réponse. La représentation géométrique du plan d'expériences et de la réponse nécessite un espace ayant une dimension de plus que l'espace expérimental. Un plan à deux facteurs utilise un espace à trois dimensions pour être représenté: une dimension pour la réponse, deux dimensions pour les facteurs.

A chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. A l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui se localisent sur une surface appelée la surface de réponse (Figure 4.19).

Le nombre et l'emplacement des points d'expériences est le problème fondamental des plans d'expériences. On cherche à obtenir la meilleure précision possible sur la surface de réponse tout en limitant le nombre d'expériences.

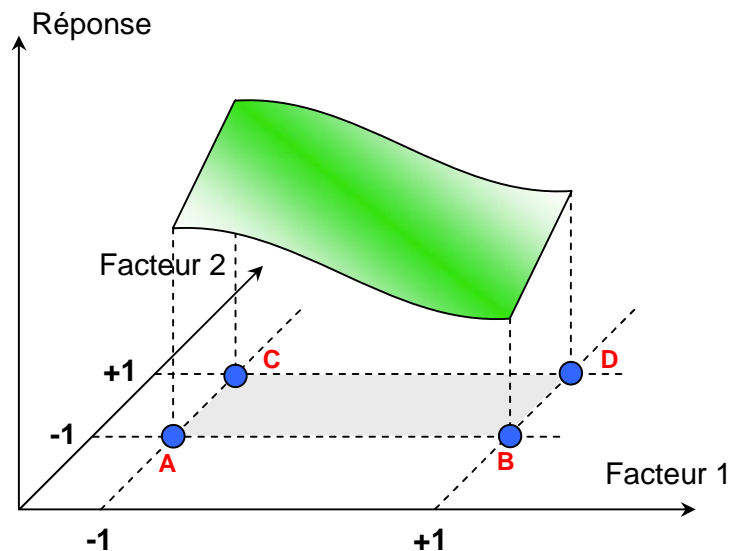


Figure 4.19 : Réponses associées aux points du domaine d'étude formant la surface de réponse.

Les quelques réponses mesurées aux points du plan d'expériences permettent de calculer l'équation de la surface de réponses.

c) Notion de modélisation mathématique

On choisit à priori une fonction mathématique qui relie la réponse aux facteurs. On prend un développement limité de la série de Taylor-Mac Laurin. Les dérivées sont supposées constantes et le développement prend la forme d'un polynôme de degré plus ou moins élevé:

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \dots + \sum a_{ii} x_i^2 + a_{ij\dots z} x_i x_j \dots x_z \quad (4.13)$$

Où

- y est la réponse ou la grandeur d'intérêt. Elle est mesurée au cours de l'expérimentation et elle est obtenue avec une précision donnée.
- x_i représente le niveau attribué au facteur i par l'expérimentateur pour réaliser un essai. Cette valeur est parfaitement connue. On suppose même que ce niveau est déterminé sans erreur (hypothèse classique de la régression).
- a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii} sont les coefficients du modèle mathématique adopté a priori. Ils ne sont pas connus et doivent être calculés à partir des résultats des expériences.

L'intérêt de modéliser la réponse par un polynôme est de pouvoir calculer ensuite toutes les réponses du domaine d'étude sans être obligé de faire les expériences. Ce modèle est appelé "modèle postulé" ou "modèle a priori".

d) Principaux avantages des plans d'expériences

Les principaux avantages de cette méthode sont:

- Diminution du nombre d'essais;
- Possibilité d'étudier un grand nombre de facteurs;
- Détection des interactions entre facteurs;
- Modélisation des réponses étudiées;
- Précision optimum des résultats.

La méthode des plans d'expériences permet une interprétation rapide et sans équivoque en fournissant un modèle expérimental précis du système étudié.

e) Les plans composites [34-35]

Les plans composites centrés, connue dans la littérature anglo saxon par « design of experiment », font partie des plans d'expérience pour l'étude des surfaces de réponse. Ce type de dispositif expérimental, permet d'estimer les effets moyens des facteurs et les interactions entre les effets des facteurs. Lorsque ces derniers sont quantitatifs, il arrive que l'on souhaite compléter cette première approche par une étude d'optimisation.

La première partie de l'étude est un plan factoriel complet ou fractionnaire complétée par des points au centre pour vérifier la validité du modèle du premier degré. Si les tests de

validation sont positifs l'étude s'achève le plus souvent, mais s'ils sont négatifs on entreprend des essais supplémentaires pour établir un modèle du second degré. Les essais supplémentaires constituent la seconde étape du déroulement de l'étude. Ces nouveaux essais sont représentés par des points d'expériences situés sur les axes de coordonnées et par de nouveaux points centraux. Les points situés sur les axes de coordonnées sont appelés les points en étoile (figure 4.20).

Les plans composites présentent donc trois parties :

- le plan factoriel : c'est un plan factoriel complet ou fractionnaire à deux niveaux par facteurs. Les points expérimentaux sont aux sommets du domaine cubique d'étude.
- Le plan en étoile : les points du plan en étoile sont sur les axes et ils sont en général tous situés à la même distance du centre du domaine d'étude.

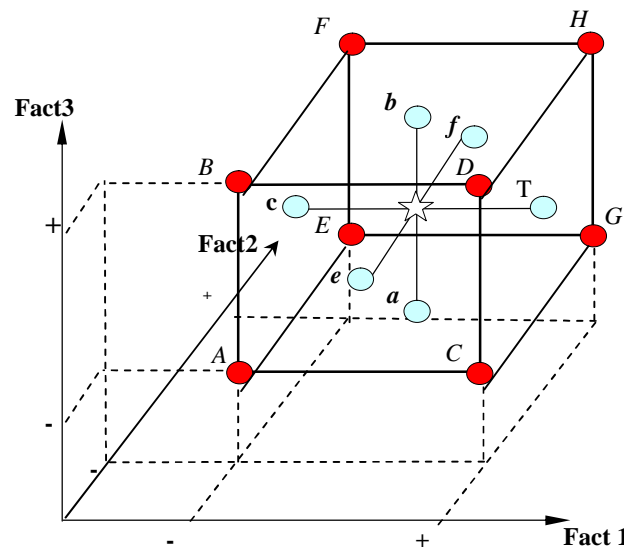


Figure 4.20 : Disposition des expériences dans un plan composite centré

- Les points au centre du domaine d'étude. On ajoute toujours des points expérimentaux situés au centre du domaine d'étude et cela aussi bien pour les plans factoriels que pour les plans en étoile (composite).

Le nombre total d'essais n à réaliser est la somme :

- des essais du plan factoriel, soit n_f ;
- des essais du plan en étoile, soit n_e ;
- des essais au centre, soit n_0

Le nombre n d'essais d'un plan composites est donné par la relation suivante :

$$n = n_f + n_a + n_0 \quad (4.14)$$

Lorsque le domaine expérimental est défini à partir des variations de k facteurs, le nombre de traitement expérimentaux proposées par un plan composite centré est donc égal à :

$$n = 2^k + 2k + n_0 \quad (4.15)$$

Avec :

- 2^k : nombre d'essais correspondant au plan factoriel.
- $2k$: nombre d'essais du plan en étoile.
- n_0 : nombre d'essais au centre.

L'intérêt des plans composites réside dans le fait qu'ils prennent facilement la suite d'un premier plan factoriel dont les résultats sont inexplicables par un modèle du premier degré. Il suffit d'effectuer les expériences correspondantes aux points en étoile et de faire les calculs sur l'ensemble de toutes les expériences. Les plans composites sont parfaitement adaptés à l'acquisition progressive des résultats. Le nombre de niveaux d'un plan composite est de cinq par facteur :

Le point central, les deux niveaux du plan factoriel et les deux niveaux des points en étoile.

Les points en étoile sont sur les axes des facteurs, mais quelle coordonnée faut-il leur donner ?

Mettons-nous dans le cas idéal où tous les emplacements sont possibles et où les contraintes expérimentales ne gênent pas. La disposition des points expérimentaux dépend alors du critère d'optimalité que l'on choisit. En général, on s'arrange pour que les erreurs sur les coefficients du modèle soient les plus petits possibles.

IV.4 Logiciel MODDE 5.0 [51]

Nous avons utilisé le logiciel MODDE 5.0 qui est un programme Windows pour la création et l'évaluation de modèles expérimentaux. Le programme aide l'utilisateur à l'interprétation des résultats et la prévision des réponses. Il calcule les coefficients du modèle mathématique et identifie les meilleures adaptations des facteurs permettant d'optimiser le processus.

En outre, le programme calcule deux importants critères statistiques qui permettent de valider ou non le modèle mathématique, symbolisé par R^2 et Q^2 . Le premier est appelé la qualité de l'ajustement, et est une mesure de la façon dont le modèle peut être adapté à des données brutes, il varie entre 0 et 1 , où 1 indique un modèle parfait et 0 indique aucun

modèle. Le deuxième critère est appelé la qualité de prédiction, et estime la puissance prédictive du modèle. Comme R^2 , Q^2 a une limite supérieure 1, mais sa limite inférieure est moins l'infini ($-\infty$). Pour qu'un modèle puisse passer le test de diagnostic, les deux paramètres doivent être élevés, et de préférence non séparés par plus de 0,2 à 0,3.

IV.5 Plans d'expériences « un-facteur-à-la-fois »

Des essais préliminaires ont été fait afin d'étudier l'influence de facteurs de commande contrôlables et leurs domaine de variation, en employant les résultats de plusieurs expériences « d'un-facteur-à-la fois ».

Le système solaire photovoltaïque comprend deux facteurs contrôlables (entrées) qui sont :

- L'angle d'orientation de panneau sud-nord : α [°] ;
- L'angle d'orientation de panneau est-ouest : β [°] ;

Afin d'étudier l'influence de la variation de l'angle d'orientation est-ouest sur la réponse nous avons mesuré la puissance produite par le système photovoltaïque en fonction de la variation de l'angle d'orientation est-ouest lors de passage des nuages pendant une journée d'automne de 8h00 à 17h00.

Les résultats de mesures sont représentés dans les figures 4.20 à 4.22. Ces résultats montrent que le maximum de puissance est obtenu le matin (entre 10 et 12 heures) pour une orientation Est-ouest de -30° et une inclinaison sud-nord de 45° . Par contre nous avons noté que le maximum de puissance est obtenu l'après-midi (entre 13 et 15 heures) pour une orientation Est-ouest de $+30^\circ$ et une inclinaison sud-nord de 30° .

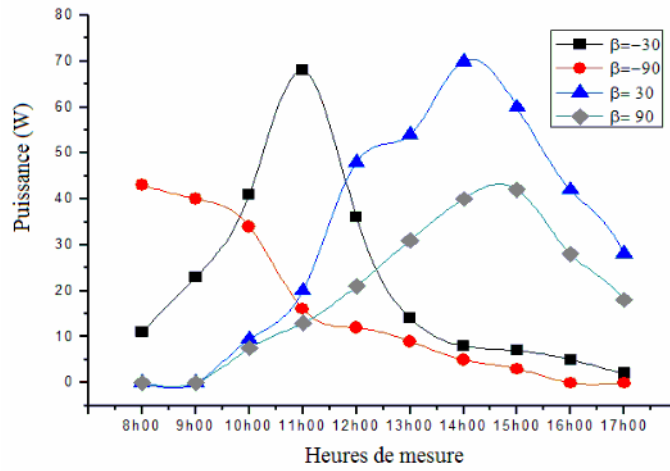


Fig4.20 : Variation de la puissance produite pendant les heures du jour pour $\alpha = 30^\circ$ et pour différentes valeurs de

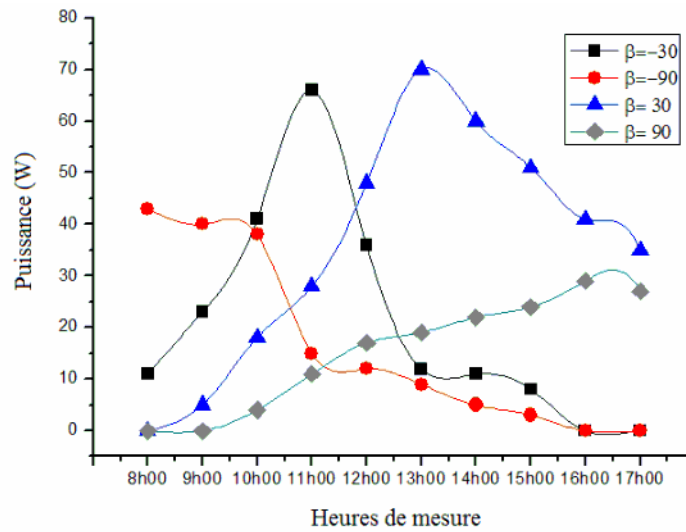


Figure4.21: Variation de la puissance produite pendant les heures du jour pour $\alpha = 45^\circ$ et pour différentes valeurs de

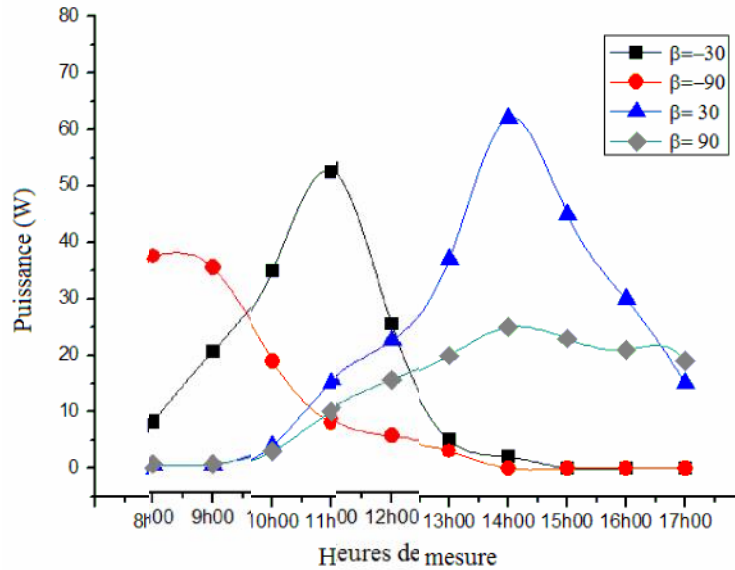


Figure 4.22 : Variation de la puissance produite pendant les heures du jour pour $\alpha = 60^\circ$ et pour différentes valeurs de β

Les résultats montrent que l'orientation Est-Ouest du générateur présente un facteur significatif qui a une grande influence sur la puissance produite par le générateur photovoltaïque. Le passage de nuages reflète une partie importante de rayons de soleil ce qui nous oblige à trouver des positions optimales, de faire en sorte que le panneau absorbe le maximum de rayons provenant du soleil et du nuage.

Les résultats trouvés permettent de déterminer les intervalles de variation de chaque facteur comme suit :

Pour le premier plan [8h00, 11h00]

- l'orientation nord-sud α : $\alpha_{\min} = 30^\circ$; $\alpha_{\max} = 60^\circ$
- l'orientation est-ouest β : $\beta_{\min} = -90^\circ$; $\beta_{\max} = -30^\circ$

Pour le deuxième plan [11h00, 14h00]

- l'orientation nord-sud α : $\alpha_{\min} = 30^\circ$; $\alpha_{\max} = 60^\circ$
- l'orientation est-ouest β : $\beta_{\min} = -30^\circ$; $\beta_{\max} = 30^\circ$

Pour le troisième plan [14h00, 17h00]

- l'orientation nord-sud α : $\alpha_{\min} = 30^\circ$; $\alpha_{\max} = 60^\circ$
- l'orientation est-ouest β : $\beta_{\min} = 30^\circ$; $\beta_{\max} = 90^\circ$

Une fois les expériences effectuées, les résultats obtenus des puissances correspondant aux 11 essais pour les deux plans CCF, correspondant aux trois parties de la journée sont reportés aux tableaux 4.1, 4.2 et 4.3.

La matrice d'expériences d'un tel plan à deux facteurs est donnée par les tableaux :

Tableau 4.1 : PLAN SURFACE DE REPONSE MESURES A 09H30 (T=17°C, ensoleillement = 400 LUX)

Test			Puissance
1	30	-90	53,2
2	60	-90	38,22
3	30	-30	72,2
4	60	-30	59,2
5	30	-60	60,45

6	60	-60	48,36
7	45	-90	42,55
8	45	-30	66,5
9	45	-60	57
10	45	-60	57
11	45	-60	57

Les valeurs (-90) et (-30) désignent les valeurs
Max et Min des facteurs

Tableau 4. 2 : PLAN SURFACE DE REPONSE MESURES A 12H30
(T=17°C, ensoleillement = 400 LUX).

Test	α	β	Puissance
1	30	-30	72,2
2	60	-30	59,2
3	30	30	75,66
4	60	30	60,82
5	30	0	75,2
6	60	0	63
7	45	-30	68
8	45	30	70,2
9	45	0	70,3
10	45	0	70,3
11	45	0	70,3

Les valeurs (-30) et (30) désignent les valeurs
Max et Min des facteurs

Tableau 4.3 : PLAN SURFACE DE REPONSE MESURES A 15H30
(T=17°C, ensoleillement = 400 LUX)

Test			puissance
1	30	30	75,66

2	60	30	60,82
3	30	90	28
4	60	90	17,8
5	30	60	60,76
6	60	60	43,68
7	45	30	70,2
8	45	90	28,8
9	45	60	56,26
10	45	60	56,26
11	45	60	56,26

Les valeurs (30) et (90) désignent les valeurs Max et Min des facteurs

On peut lire sur ces tableaux la puissance en considérant comme facteurs les angles d'orientation sud-nord et est-ouest.

Sur la base de ces résultats, les modèles mathématiques proposés par MODDE 5.0 sont les suivants :

Pour la première partie de la journée [09H30]

$$P = 56.2053 - 6.67833 \alpha + 10.65\beta - 0.60816 \alpha * \alpha - 0.48815\beta * \beta + 0.495003 \alpha * \beta$$

$$R^2 = 98.4 \% ; Q^2 = 86.7\%$$

Pour la deuxième partie de la journée [12H30]

$$P = 70.4958 - 6.67333 \alpha + 1.2133 \beta - 1.68947 \alpha * \alpha - 1.68948 \beta * \beta - 0.46 \alpha * \beta$$

$$R^2 = 99.5 \% ; Q^2 = 95.1\%$$

Pour la troisième partie de la journée [15.30]

$$P = 56.2368 - 7.02 \alpha - 22.0133 \beta - 3.9821 \alpha^2 - 6.7021 \beta^2 + 1.16 \alpha\beta$$

$$R^2 = 99.6 \% ; Q^2 = 96.2\%$$

D'après les valeurs de R^2 et Q^2 , on peut dire que notre modèle mathématique est bien ajusté et possède un pouvoir prédictif élevé. La démarche séquentielle doit être arrêtée à ce niveau puisque le but est atteint.

Avant de commenter et d'analyser ces équations, il faut confirmer que ces modèles sont valides et peuvent être utilisés pour l'analyse et l'optimisation du rendement. Les critères R^2 et Q^2 précédemment postulés étant bien supérieurs à 0,8 pour les trois modèles ont permis de valider ces derniers. Les diagrammes de la Fig.4.23, Fig.4.24 et Fig.4.25 représentent respectivement, les valeurs des coefficients du modèle pour les trois parties de la journée, obtenus avec MODDE 5.0

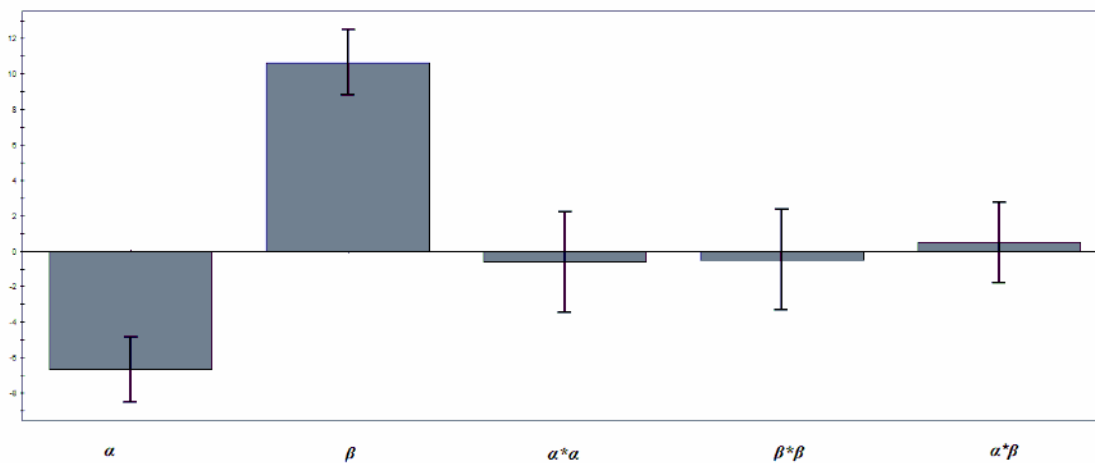


Figure 4.23 : Coefficients tracés du modèle pour le premier plan (09h30)

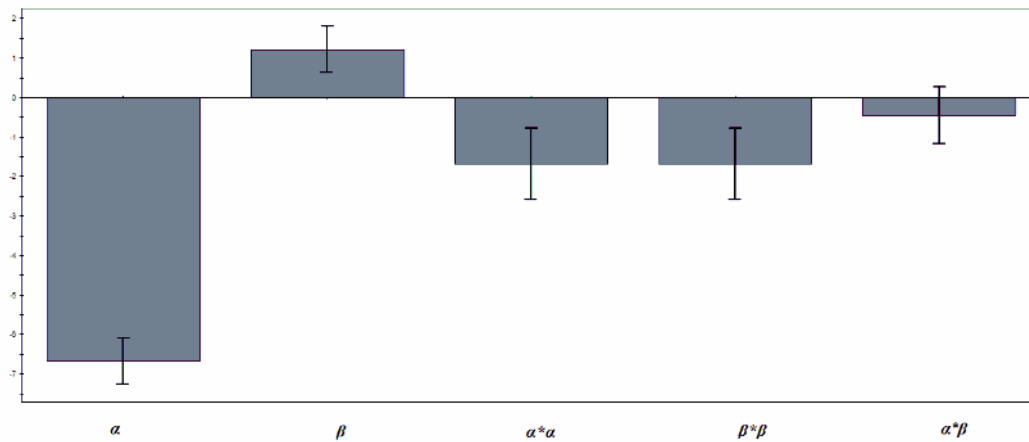


Figure 4.24 : Coefficients tracés du modèle pour le premier plan (12h30)

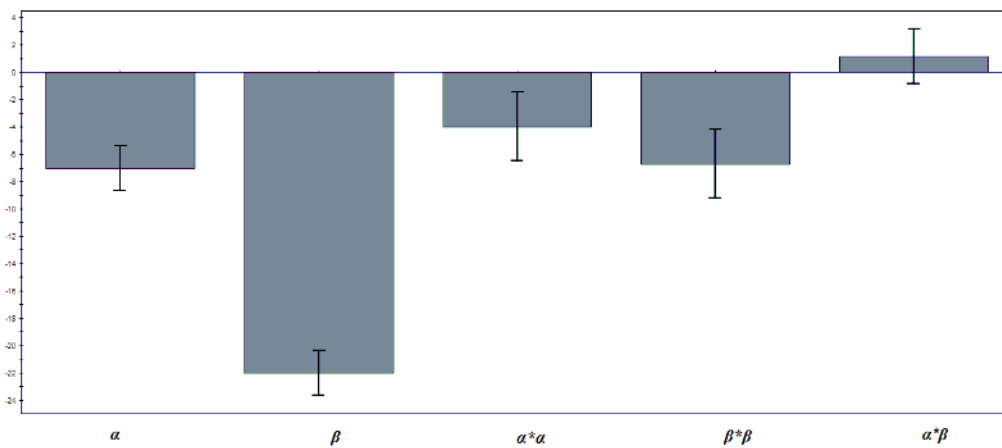


Figure 4.25 : Coefficients tracés du modèle pour le premier plan (15h30)

La qualité du modèle mathématique obtenu peut être évaluée par des tests statistiques qui sont donnés directement par le programme MODDE 5.0.

Ces tests statistiques sont :

- Rapport R^2 :

Permet d'évaluer le degré d'explication du modèle mathématique établi (réponses prédites) par rapport aux réponses mesurées. Un bon modèle doit avoir un R^2 proche de l'unité.

- Rapport Q^2 :

Le coefficient Q^2 est très similaire au coefficient R^2 ; il est parfois appelé R^2 prédictif. Il peut être négatif pour les très mauvais modèles. Des valeurs proches de l'unité désignent de la même façon des modèles bien ajustés aux données expérimentales [45].

Les angles d'orientation de panneau est-ouest et sud-nord influent considérablement sur la puissance produite dans les trois plans que ce soit d'une manière positive ou négative cela signifie que l'orientation de panneau avec un angle nord-sud de manière que les rayons provient directement de soleil ou réfléchis par les nuages soient perpendiculaire au panneau.

Les Courbes iso-réponse calculée avec MODDE 5.0 pour les trois plans (fig 4.26, 4.27 et 4.28) représentant la réponse du processus (puissance) et les différentes zones où la puissance varie en fonction des angles d'orientations.

Les zones en couleur rouge montrent les intervalles où la puissance atteint son maximum.

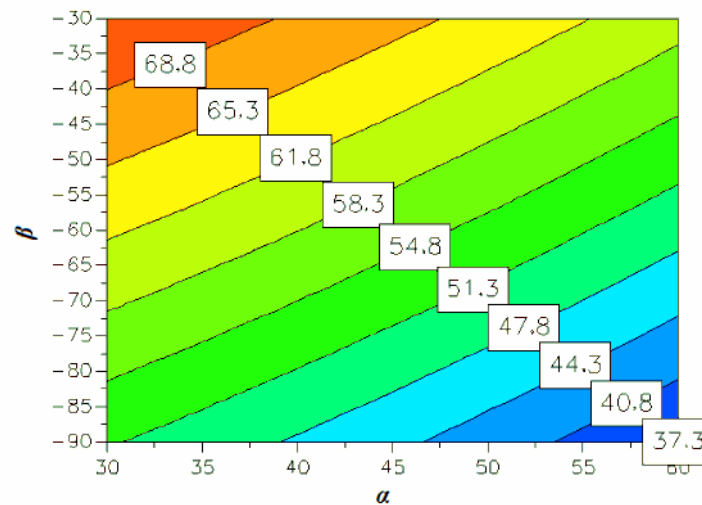


Figure 4.26 : Courbe iso-réponse calculée avec MODDE 5.0 pour le premier plan
($T= 17\text{ }^{\circ}\text{C}$ $S=410\text{ lux}$) mesuré à 09h30.

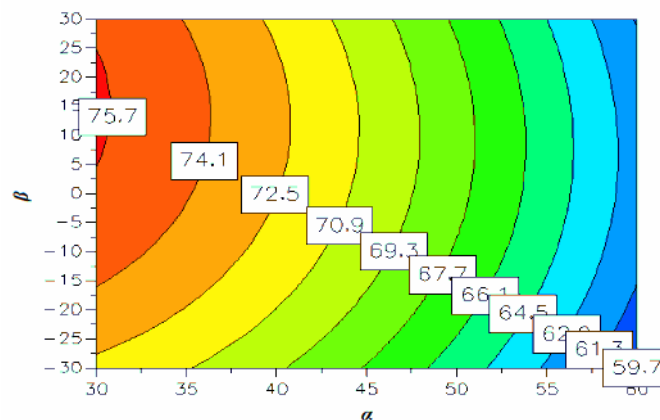


Figure 4.27 : Courbe iso-réponse calculée avec MODDE 5.0 pour le deuxième plan représentant la réponse du processus (puissance) pour une température de $T = 17\text{ °C}$ et ensoleillement de $S=418\text{lux}$ mesuré à 12h30.

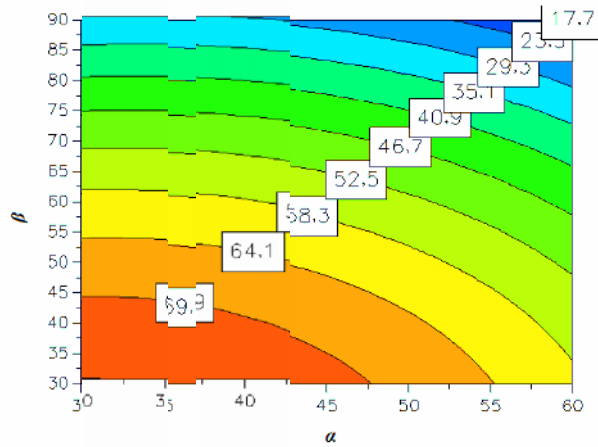


Figure 4.28 : Courbe iso-réponse calculée avec MODDE 5.0 pour le troisième plan ($T = 17\text{ °C}$ et $S=400\text{ lux}$) mesuré à 15H30.

Les valeurs optimales des trois facteurs sont alors déterminées par une analyse statistique des résultats obtenus, grâce à la fonction d'optimisation du logiciel.

Ces valeurs telles que proposées sont les suivantes :

- Pour le premier plan $\alpha = 30^\circ$; $\beta = -30^\circ$; $P=71.94\text{ W}$
- Pour le deuxième plan $\alpha = 30^\circ$; $\beta = 14.85^\circ$; $P=75.90\text{ W}$
- Pour le troisième plan $\alpha = 30^\circ$; $\beta = 30^\circ$; $P=75.74\text{ W}$

Validation expérimentale

Afin de vérifier expérimentalement les valeurs optimales fournis par le modèle nous avons mesuré la puissance produite par le panneau ainsi que la concentration d'ozone dissous dans l'eau et produit par le générateur d'ozone, en utilisant l'analyseur d'ozone, pendant une journée lors de passage de nuages en orientant le panneau vers ses positions optimales.

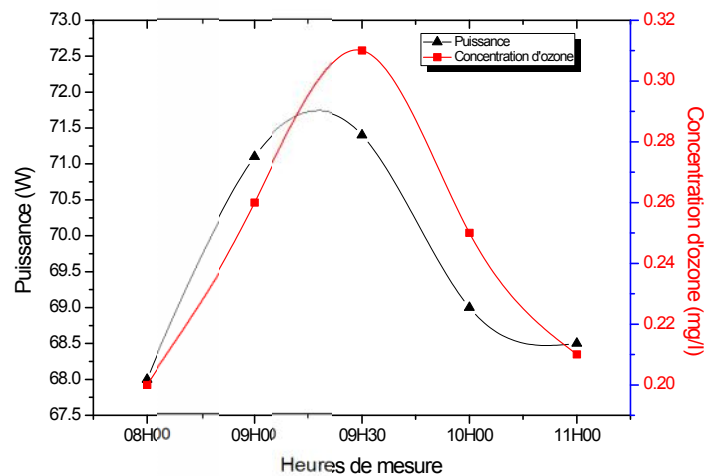


Figure 4.29 : Puissance et concentration d'ozone mesurée

($\alpha = 30^\circ$; $\beta = -30^\circ$ (08H-11H))

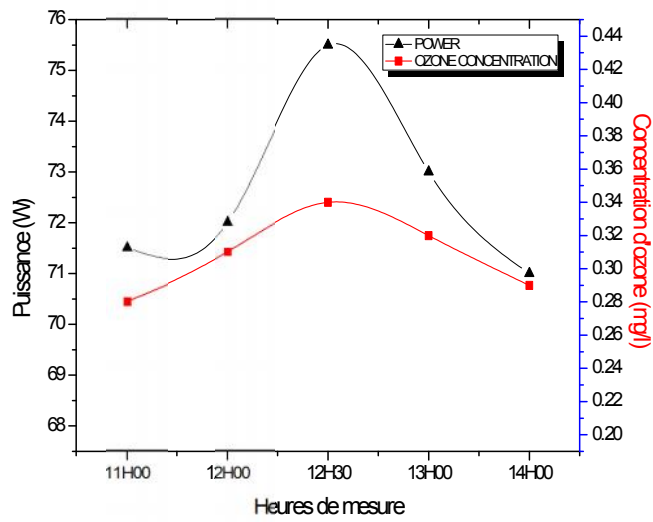


Figure 4.30 : Puissance et concentration d’ozone mesurée

($\alpha = 30^\circ$: $\tau = 14,85^\circ$ (11H-14H))

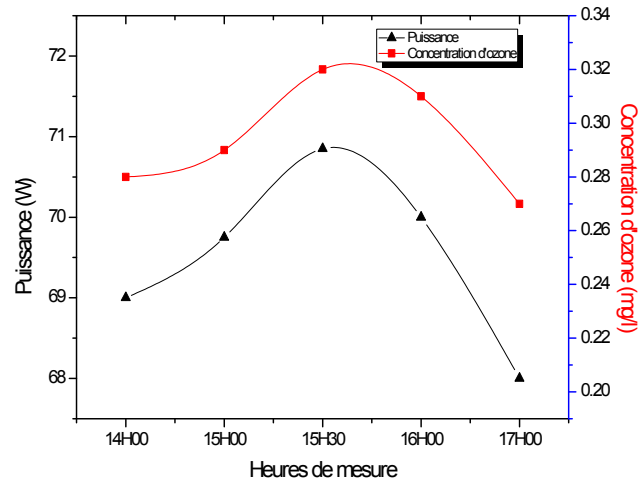


Figure 4.31: Puissance et concentration

d'ozone mesurée = 30°: $\alpha = 30^\circ$ (14H-17H)

Les résultats présentés dans les figures (4.29, 4.30 et 4.31) montrent que la puissance reste toujours supérieure à 65 Watt en orientant le générateur vers ses positions optimales pendant toute la journée lors de passage de nuages ce qui assure le meilleur fonctionnement de générateur d'ozone en assurant une concentration d'ozone supérieurs à 0.22 mg/L qui permet la désinfection de l'eau.

CONCLUSION

Malgré le nombre impressionnant d'études développées dans le domaine de l'énergie solaire ces dernières années nous avons constaté qu'il existe un problème de nuage qui cause l'insuffisance de l'énergie produite par les panneaux solaires comme dans notre cas ; un panneau produisant 135W lors d'une journée ensoleillée n'a pu produire que 50W lors d'un passage du nuage.

Le but recherché consiste à déterminer les valeurs optimales des angles d'orientations (est-ouest et sud-nord), afin de maximiser la puissance produite par le système solaire photovoltaïque.

La détermination des valeurs optimale est nécessaire durant le passage de nuages pour une journée complète. L'utilisation de la méthode des plans d'expériences (MPE) s'est avérée un outil efficace pour optimiser le rendement du panneau lors de l'influence du nuage, et peut-être élargie à d'autres procédés. Il a été montré que la puissance produite par ce panneau est supérieure à 65W d'où on a pu alimenter le générateur d'ozone.

La réalisation d'un générateur photovoltaïque plus puissant s'avère nécessaire. Cela fera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre V Simulation et Réalisation d'un Générateur Photovoltaïque

V-1 Introduction

Aujourd'hui, une part croissante de l'énergie électrique est produite à partir des sources d'énergies renouvelables.

Les systèmes éolien et solaire sont les plus répandus, mais l'important potentiel solaire en Algérie avantage les systèmes solaires. Plus précisément, l'installation des systèmes photovoltaïques (PV), isolés ou connectés au réseau, peuvent être utilisés dans presque tous les lieux avec des dimensionnements appropriés.

Le programme national de développement des énergies renouvelables dans sa version actualisée par les services du ministère de l'énergie vient d'être adopté par le gouvernement en février 2015.

En effet, l'intégration des énergies renouvelables dans le mix énergétique national constitue un enjeu majeur dans la perspective de préservation des ressources fossiles, de diversification des filières de production de l'électricité et de contribution au développement durable.

Ce programme a connu une première phase consacrée à la réalisation de projets pilotes et de tests des différentes technologies disponibles, durant laquelle des éléments pertinents concernant les évolutions technologiques des filières considérées sont apparus sur la scène énergétique et ont conduit à la révision de ce programme.

Parmi ces éléments nouveaux, il convient de citer :

- ▶ une meilleure connaissance du potentiel national en énergies renouvelables, notamment pour le solaire et l'éolien, suite aux études engagées ;
- ▶ la baisse des coûts des filières photovoltaïque et éolienne qui s'affirment de plus en plus sur le marché pour constituer des filières viables à considérer ;
- ▶ les coûts encore élevés de la filière CSP (solaire thermique) induisant une croissance très lente du développement de ce marché à travers le monde ;
- ▶ le parachèvement d'une réglementation nationale cohérente et attractive en direction des investisseurs.

La répartition de ce programme par filière technologique, se présente comme suit : figure 5.1 [52]

- ▶ Solaire Photovoltaïque : 13 575 MW
- ▶ Eolien : 5010 MW
- ▶ Solaire thermique : 2000 MW
- ▶ Biomasse : 1 000 MW
- ▶ Cogénération : 400 MW
- ▶ Géothermie : 15 MW

Objectifs du programme algérien des Energies Renouvelables

22 GW à l'horizon 2030

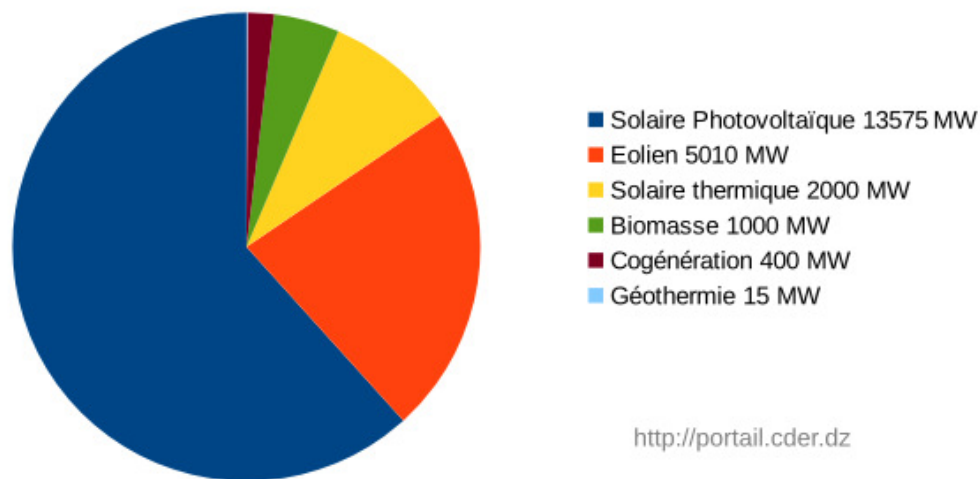


Figure 5.1 Programme algérien des énergies renouvelables (source portail.cder.dz)

V.2. Eléments d'une Installation PV

Les diverses composantes d'un système photovoltaïque sont représentées symboliquement dans la **figure 5.1**. Cette représentation synoptique recouvre à peu près tous les cas de figure que nous pouvons rencontrer dans un système PV. Mais il est bien certain qu'un système PV ne comporte en général qu'un nombre défini d'éléments. [54]

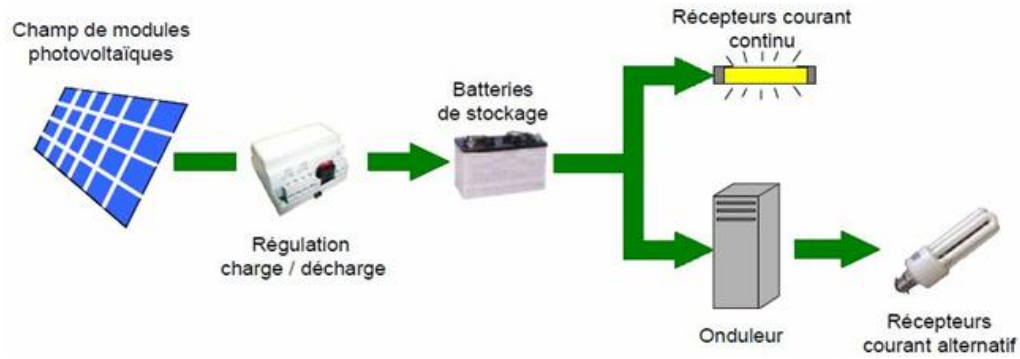


Figure 5.2 : Schéma général d'une installation PV avec stockage d'énergie

V.3. Différents types de systèmes photovoltaïques

V.3.1. Systèmes hybrides individuels

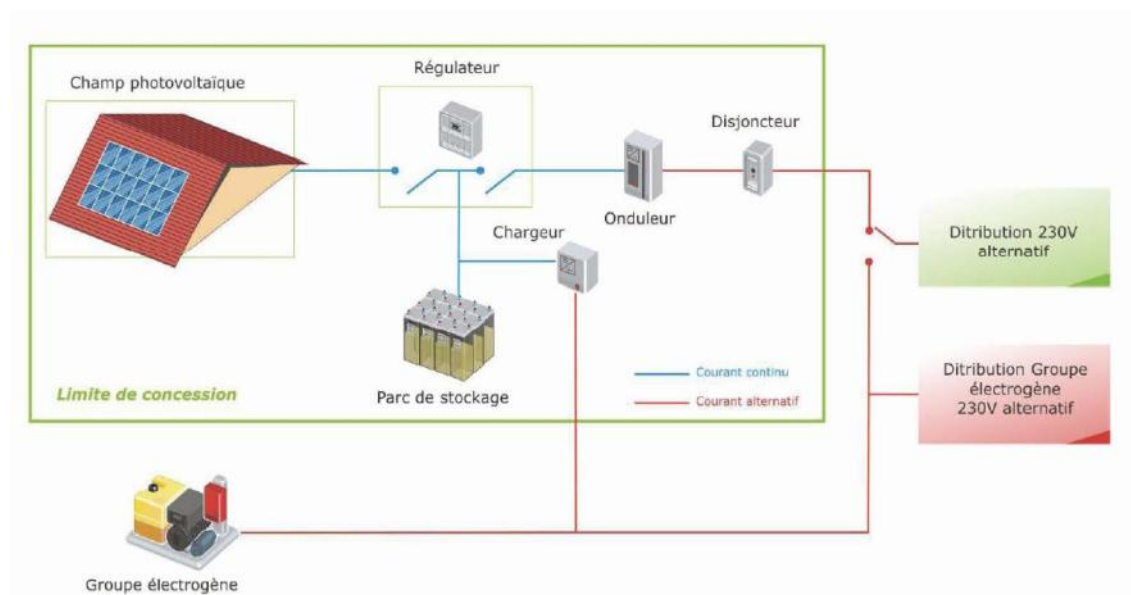


Figure 5.3 : Systèmes hybrides individuels [54]

V.3.2. Systèmes autonomes avec batterie d'accumulateurs

Applications principales : électrification habitat, télécommunication, signalisation routière, etc.

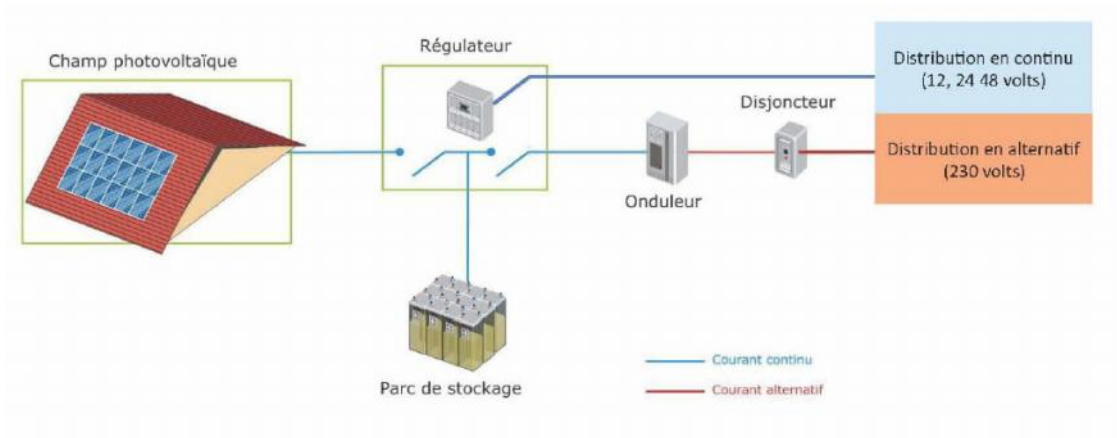


Figure 5.4 : Systèmes autonomes avec batterie d'accumulateurs [54]

V.3.3. Systèmes PV raccordés réseau

V.3.3.1. Vente totale

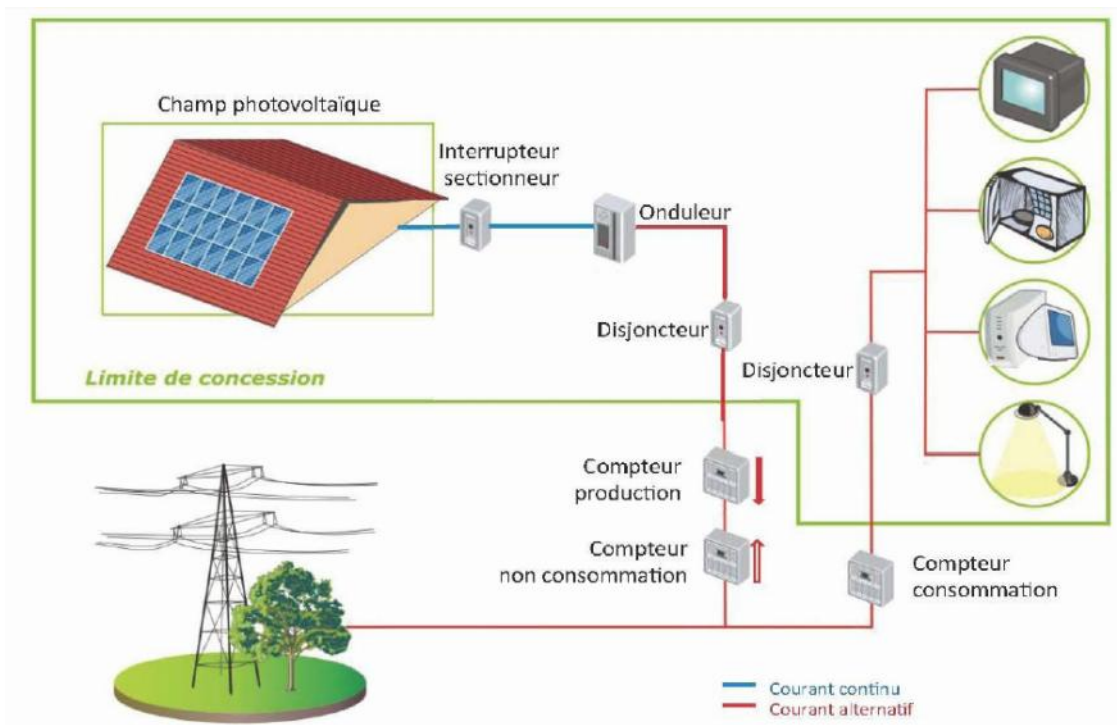


Figure 5.5 : Production de l'énergie photovoltaïque avec la vente totale [54]

V.3.3.2. Vente du surplus

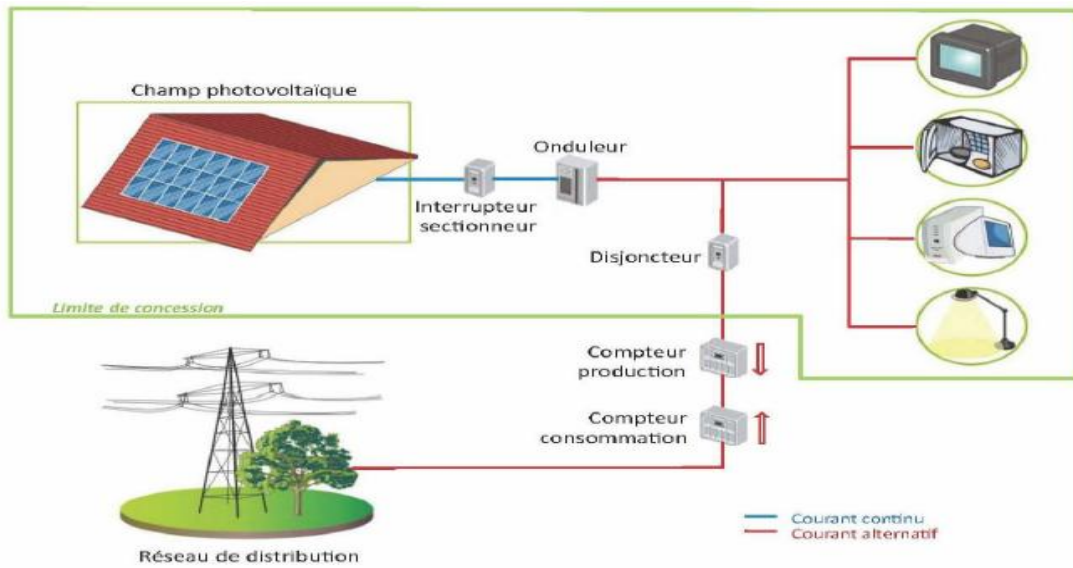


Figure 5.6 : Production de l'énergie photovoltaïque avec la vente du surplus [54]

V.4. Première centrale photovoltaïque en Algérie

Le système PV connecté au réseau du centre de développement des énergies renouvelables CDER, est le premier système PV connecté au réseau en Algérie. Le projet intitulé « Centre d'Expérimentation Photovoltaïque pour l'Algérie » a été financé par l'Agence Espagnole de Coopération Internationale (AECI), et concrétisé à 100 % par une équipe interne au CDER.

V.4.1 Coordonnées géographiques du CDER

Latitude : 36°48'04"8 Nord
 Longitude : 04° 12'08" 53 Est
 Altitude : 345 mètres



Figure 5.7 Situation géographique de CDER

V.4.2 Présentation du projet

Il a été décidé d'installer le générateur PV sur la terrasse du bloc administration du CDER pour la disponibilité de la surface (400 m²), la proximité d'un abri pour les onduleurs (sous-sol du bloc administratif) et l'absence d'ombrage sur les modules PV.

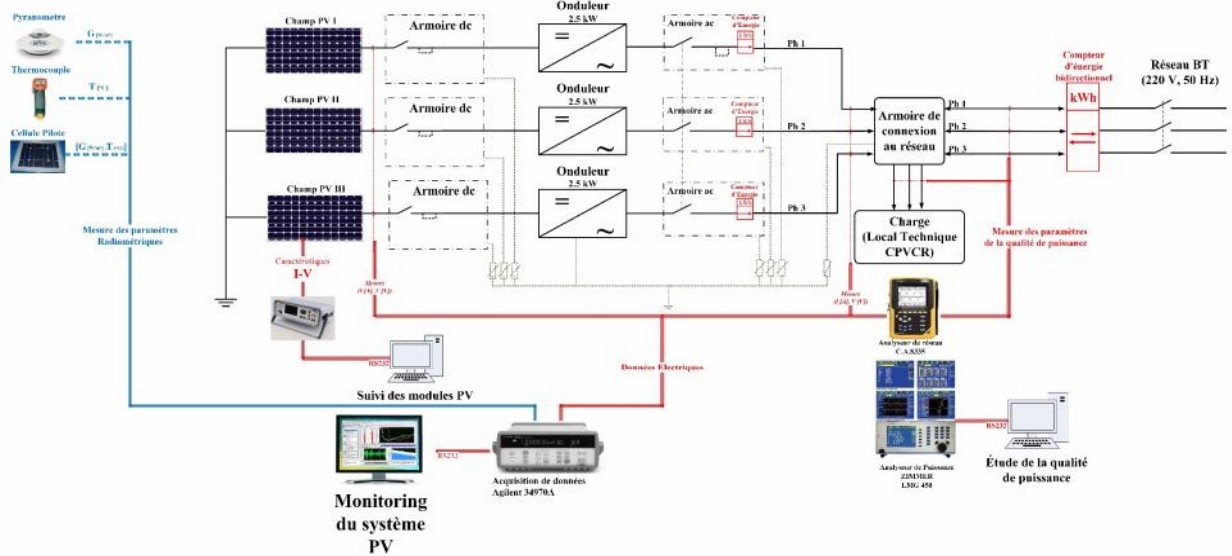


Figure 5.8 : Schéma électrique de l'installation du CDER

L'installation PV du CDER est constituée d'un générateur PV de 90 modules totalisant une puissance installée de 9,54 kWc sur une surface de 90 m². Les modules sont de type Isofoton I_106Wc/12V. Le générateur PV est partagé en trois champs de 30 modules pour une puissance installée de 3,18 kWc. Chaque champ est structuré en deux (02) branches parallèles de 15 modules en série. La structure en acier devant supporter les modules a été coupée et assemblée selon l'angle optimal de 29° plein sud



Figure 5.9 : Champ photovoltaïque du CDER

L'énergie en courant continu de chaque champ PV est transformée en énergie AC puis injectée dans le réseau électrique BT du CDER avec un onduleur synchronisateur monophasé Fronius IG 30 de puissance nominale de 2,5 kW.

V.5 Simulation du générateur PV réalisé au laboratoire ICEPS

Avant chaque réalisation pratique il est recommandé de faire une simulation du produit à développer afin de bien définir les dimensions et prévoir les paramètres de fonctionnement.

Le générateur à développer est de type isolé servant à alimenter une habitation ou un site de télécommunication situé à Sidi Bel Abbès. Le logiciel PV System a été utilisé pour la simulation.

V.5.1. Présentation du logiciel :

PV SYST est un logiciel de dimensionnement des panneaux solaires permettant d'obtenir diverses informations telles que la production d'énergie, l'irradiation et le coût de l'installation, la surface nécessaire, ou la production annuelle d'énergie. Un mode avancé permet d'obtenir beaucoup plus d'informations pour une étude très complète.

Le logiciel comprend principalement deux modes de fonctionnement (tableau.5.1). Le premier est une application de pré-dimensionnement assez simple à prendre en main et accessible au néophyte. Le deuxième permet une étude beaucoup plus approfondie et prend en compte beaucoup plus de paramètres. De plus il se base sur du matériel concret pour ses calculs, contrairement au premier mode qui effectue ses calculs pour un cas très général.

Pour chacun des deux modes, le principe est le même : on donne la localisation géographique de l'installation, puis on entre les données concernant l'installation. Vient ensuite une partie résultats où l'on choisit les données qui nous intéressent.

V.5.1.2 Menus principaux :

a. Pré-dimensionnement :

Pour une étude rapide et simple: on donne une localisation et un système puis le logiciel calcule quelques paramètres de pré-dimensionnement ainsi qu'un graphe de production énergétique annuelle, un graphe d'irradiation par mois, un tableau récapitulatif et une étude de coût.

b. Conception du projet :

Pour une étude plus approfondie avec de nombreux paramètres à prendre en compte notamment les ombres proches et lointaines. On dispose aussi de plus de choix au niveau de

l'orientation des panneaux avec le choix par exemple de panneaux " " qui suivent la

course du soleil. Les calculs sont basés sur des systèmes réels commercialisés que l'on choisira parmi une vaste liste. On génère ensuite une simulation qui nous fournit un large choix de résultats et de graphes personnalisables.

c. Outils :

Permet de modifier les bases de données et d'utiliser des outils du programme sans pour autant créer un projet complet.

V.5.1.3. Caractéristiques géographiques du site

a) Site d'implantation :

Pour la simulation de notre projet photovoltaïque, nous avons choisi le site de Sidi Bel Abbes où les données géographiques et météorologiques sont incluses dans le logiciel PV-SYST.

b) Données géographiques :

Le tableau 5.1 présente les données géographiques du site de Sidi Bel Abbes.

Caractéristiques Site	Latitude [°]	Altitude [m]	Longitude [°]
Sidi Bel Abbes	35.21	490	-0.64

Tableau 5. 1. Données géographiques du site de Sidi Bel Abbes.

c) Données météorologiques :

Le tableau 5.2 résume les caractéristiques climatiques du site de Sidi Bel Abbes.

	Irrad. Glob. kWh/m ² .jr	Diffus kWh/m ² .jr	Tempér. °C	Vit. vent m/s
Janvier	2.45	1.07	9.8	2.51
Février	3.36	1.27	10.4	2.22
Mars	4.63	1.79	12.8	2.20
Avril	5.76	2.03	14.5	2.83
Mai	6.67	2.44	17.6	2.74
Juin	7.37	2.61	22.3	2.78
Juillet	7.22	2.54	24.6	2.78
Août	6.53	2.23	25.0	2.58
Septembre	5.11	1.97	21.8	2.48
Octobre	3.86	1.45	18.3	2.15
Novembre	2.69	1.19	13.3	2.45
Décembre	2.14	1.10	10.7	2.56
Année	4.82	1.81	16.8	2.5

Tableau 5. 2: Météo mensuelle de Sidi Bel Abbas.

d) Trajectoire du soleil :

La connaissance du mouvement apparent du soleil pour un point donné de la surface terrestre est nécessaire pour toute application solaire. La position du soleil est définie par deux angles : sa hauteur **HS** (angle entre le soleil et le plan horizontal du lieu) et son azimut **AZ** (angle avec la direction du sud, compté négativement vers l'est). La figure 5.10 présente la hauteur du soleil dans le ciel en fonction de l'azimut à Sidi Bel Abbas au cours d'une année.

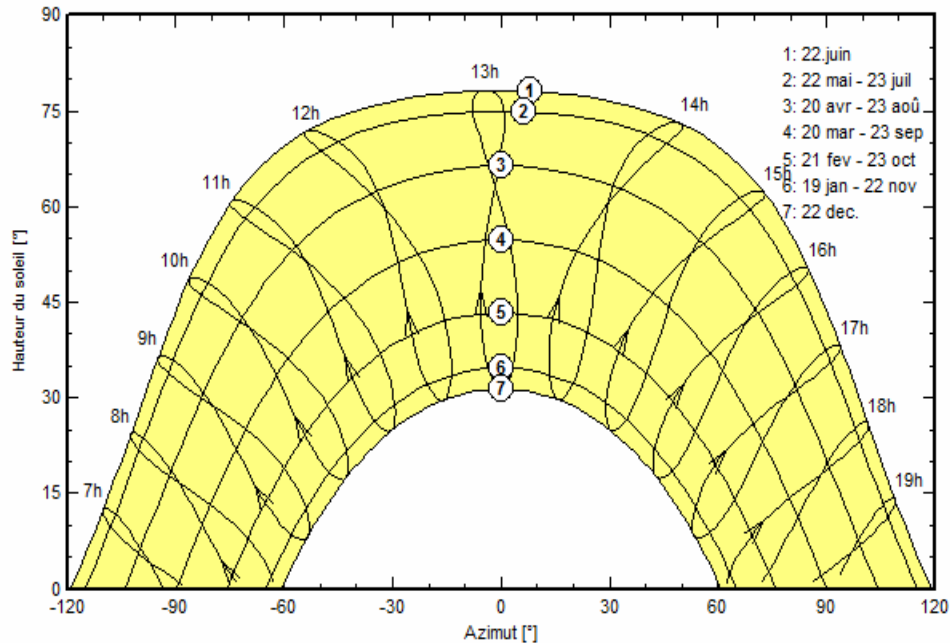


Figure 5.10 Trajectoires du soleil à Sidi Bel Abbas (Lat. 35.21°N, long.- 0.64°E, alt. 490 m).

V.5.1.4. Simulation de systèmes PV avec le logiciel PVSYST

La simulation détaillée d'un système PV comporte :

- * Le choix des composants (panneaux PV, onduleur, matériel de raccordement, ...etc.) ;
- * La disposition détaillée du champ de capteurs (orientation, mode de montage, ...etc.) ;
- * L'estimation de l'énergie produite ;
- * Une évaluation des coûts de l'installation, et le prix du kWh résultant.

a). Orientation des modules PV

Vu le prix élevé des modules PV, il est nécessaire de choisir des orientations et inclinaisons favorables à la production d'énergie.

Nous avons choisi "un plan incliné fixe" d'une inclinaison 30° (par rapport à l'horizontale) et une orientation plein sud de 0° comme l'illustre la figure 5.11

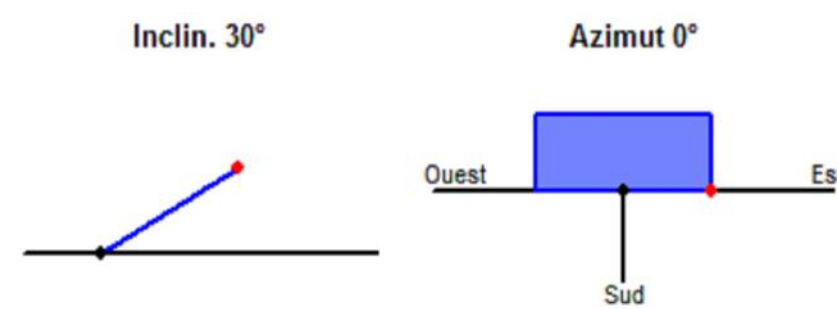


Figure 5.11 : Positionnement des systèmes de panneaux (plan incliné fixe).

c). Simulation :

PVSYST V5.74		22/04/15		Page 1/4	
Système isolé avec batteries: Paramètres de simulation					
Projet : Tp 001					
Site géographique		Sidi bel-abbès		Pays: Algeria	
Situation		Latitude 35.2°N		Longitude 0.6°W	
Temps défini comme		Temps légal		Fus. horaire TU+1	
		Albédo 0.20		Altitude 483 m	
Données météo : Sidi bel-abbès, Données horaires synthétiques					
Variante de simulation : Nouvelle variante de simulation					
Date de la simulation 22/04/15 à 17h37					
Paramètres de simulation					
Orientation plan capteurs		Inclinaison 30°		Azimut 0°	
Caractéristiques du champ de capteurs					
Module PV		SI-mono		Modèle 8TP 0868-12/Bb	
				Fabricant Suntech	
Nombre de modules PV		En série 1 modules		En parallèle 4 chaînes	
Nombre total de modules PV		Nbre modules 4		Puissance unitaire 85 Wc	
Puissance globale du champ		Nominale (STC) 340 Wc		Aux cond. de fonct. 306 Wc (50°C)	
Caractéristiques de fonct. du champ (50°C)		U mpp 16 V		I mpp 19 A	
Surface totale		Surface modules 2.8 m²			
Facteurs de perte du champ PV					
Fact. de pertes thermiques		Uc (const) 20.0 W/m²K		Uv (vent) 0.0 W/m²K / mis	
=> Tempér. de fonct. nominale (G=800 W/m², Tamb=20°C, Venti=1m/s.)				NOCT 55 °C	
Perte ohmique de câblage		Rés. globale champ 14 mOhm		Frac. pertes 1.5 % aux STC	
Perte de qualité module				Frac. pertes 1.5 %	
Perte de "mismatch" modules				Frac. pertes 4.0 % (tension fixée)	
Effet d'incidence, paramétrisation ASHRAE		IAM = 1 - bo (1/cos I - 1)		Paramètre bo 0.05	
Paramètres du système		Type de système		Système isolé avec batteries	
Batterie		Modèle		Volta 88B100	
		Fabricant		Volta	
Caractéristiques du banc de batteries		Tension 12 V		Capacité nominale 400 Ah	
		Nombre d'unités 4 en parallèle			
		Température		Fixée (20°C)	
Régulateur		Modèle		General Purpose Default	
		Technologie		Undefined	
Seuils de régulation batterie		Charge 13.5/13.1 V		Coeff. de temp. -5.0 mV/°C/elem.	
Commande génératrice d'appoint		11.8/12.9 V		Décharge 11.8/12.6 V	
Besoins de l'utilisateur :		Consomm. domestique moyenne		Constants sur l'année 1.6 kWh/Jour	

Figure 5. 12 : Paramètres de simulation du système PV

Le champ PV sera constitué de 4 modules PV répartis comme suit :

* 1 module connecté en série.

* 4 branches en parallèle.

d). Résultats de simulation

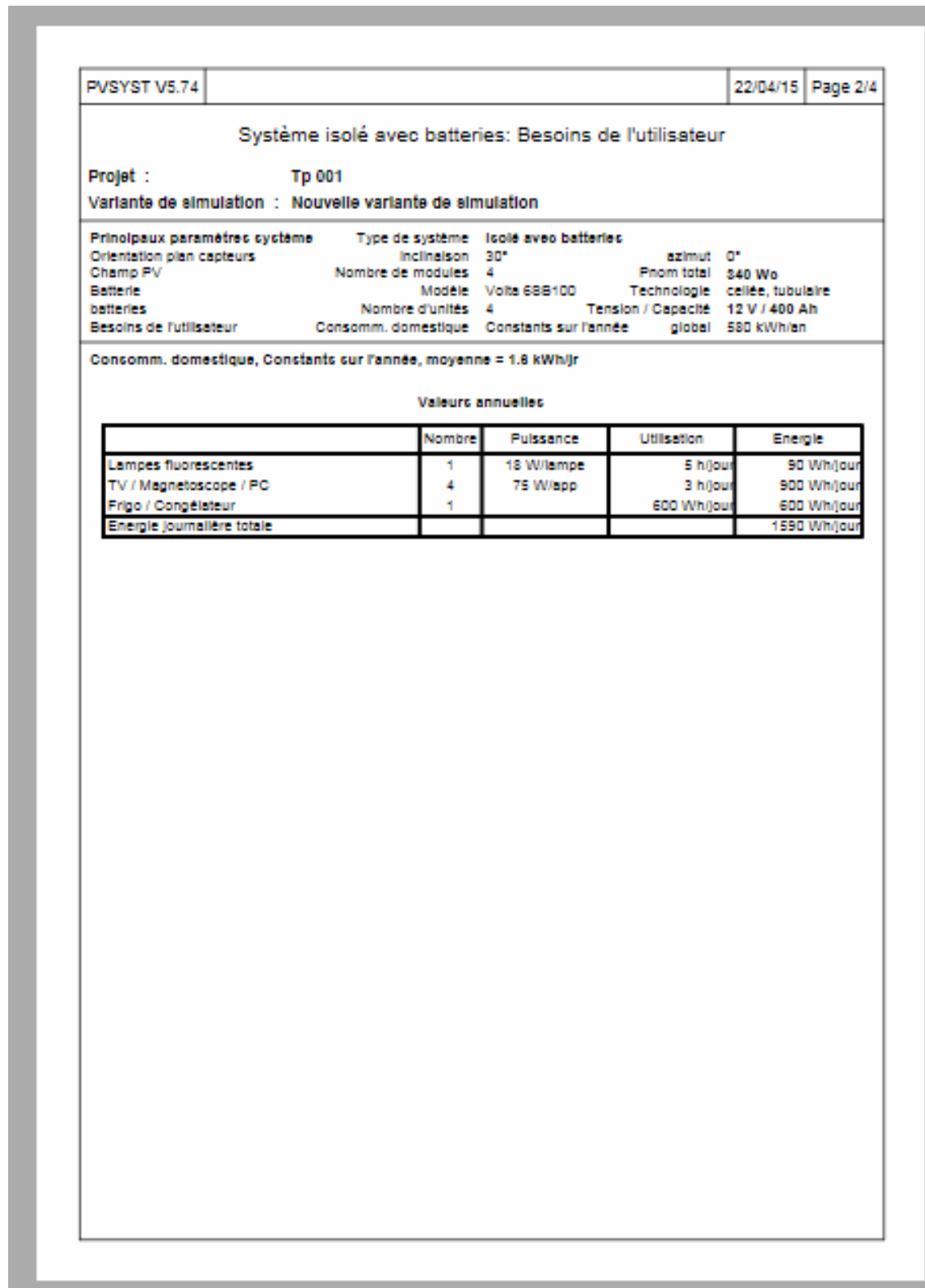


Figure 5.13 : Données du projet

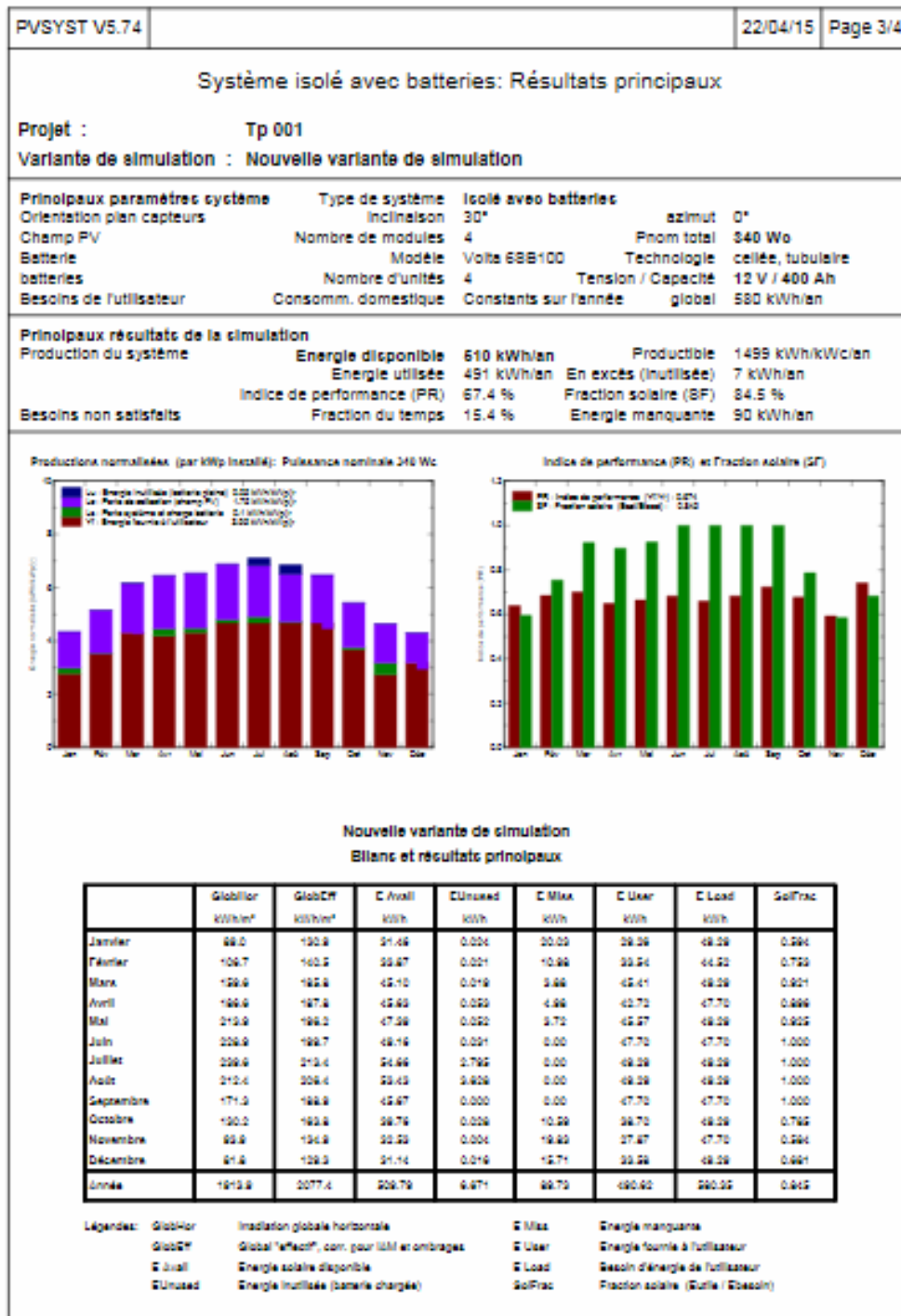


Figure 5.14 : Résultats de la simulation

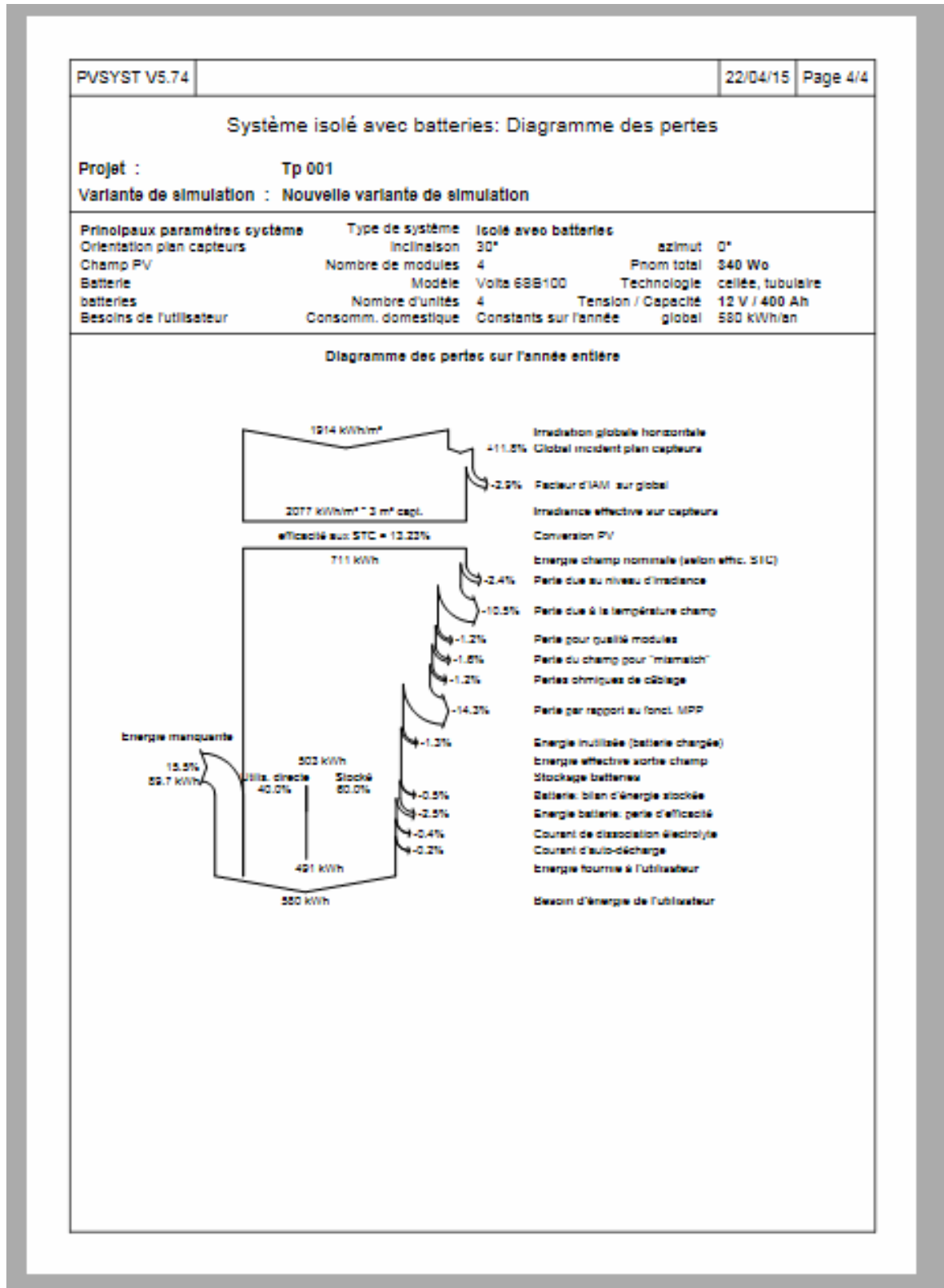


Figure 5.15 : Diagramme des pertes

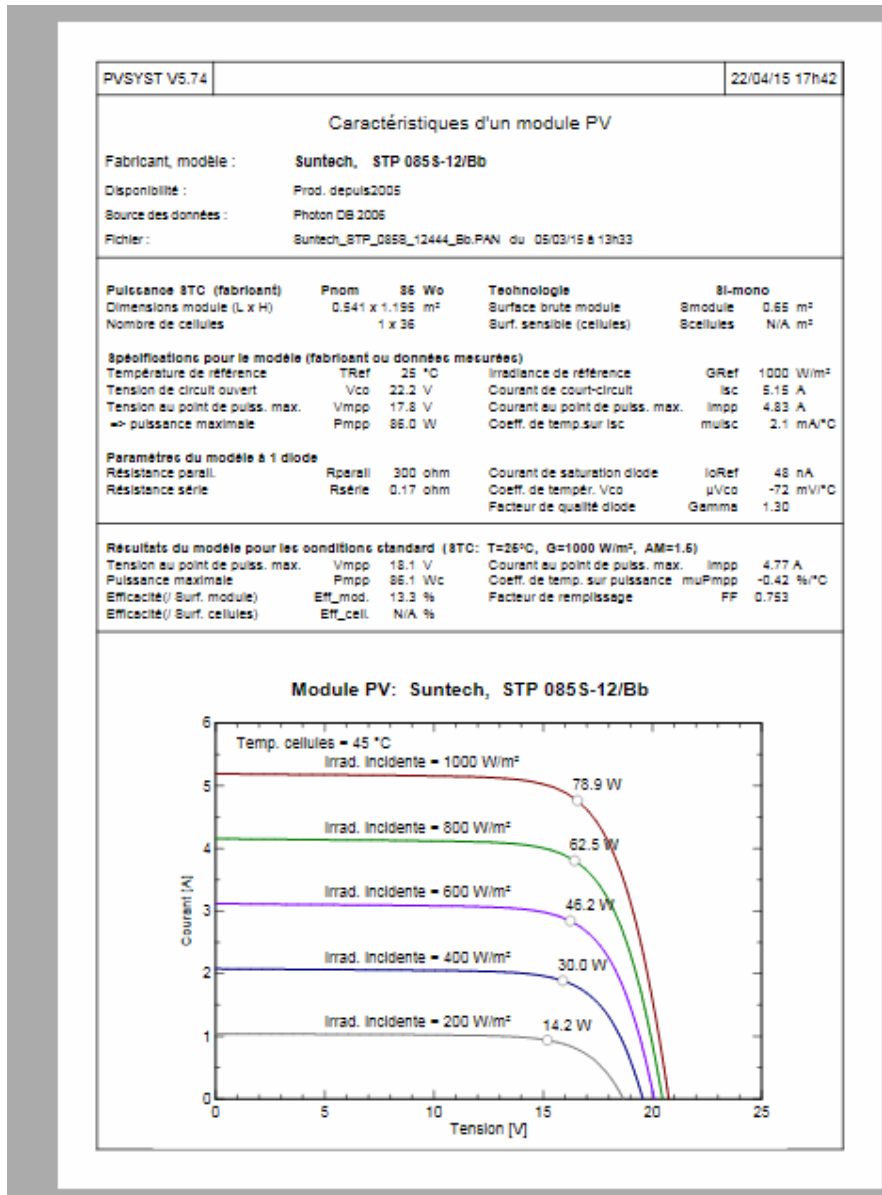


Figure 5.16 : Caractérisations des PV

V.5.2 Etape de réalisation du générateur photovoltaïque

Après la simulation du générateur PV une série de structure métallique était développée. Après plusieurs tentatives de réalisation la structure suivante a été retenue.

V.5.2.1 Structure métallique motorisée

La structure métallique est prévue pour recevoir quatre panneaux photovoltaïques monocristallins de 85 Watts chacun. Cette structure est motorisée et commandée à distance. Pour le suivi du soleil (Est-Ouest) le générateur est équipé d'un moteur de 500W. Le Générateur peut faire une rotation de

180°. Pour la variation de l'angle d'inclinaison (Nord-sud) le générateur est équipé d'un moteur de 100 W permettant une variation d'inclinaison de 90°



Figure 5. 17 : Structure métallique avec motorisation porteuse des panneaux PV



Figure 5.18 : Photo du générateur à deux axes de 340Watts

Le générateur est composé de quatre panneaux de 85 Wcc chacun. Il est à deux axes de rotation. L'inclinaison et l'orientation sont motorisées et télécommandées.

V.5.2.2 : Schéma électriques du générateur(figure 5.19)

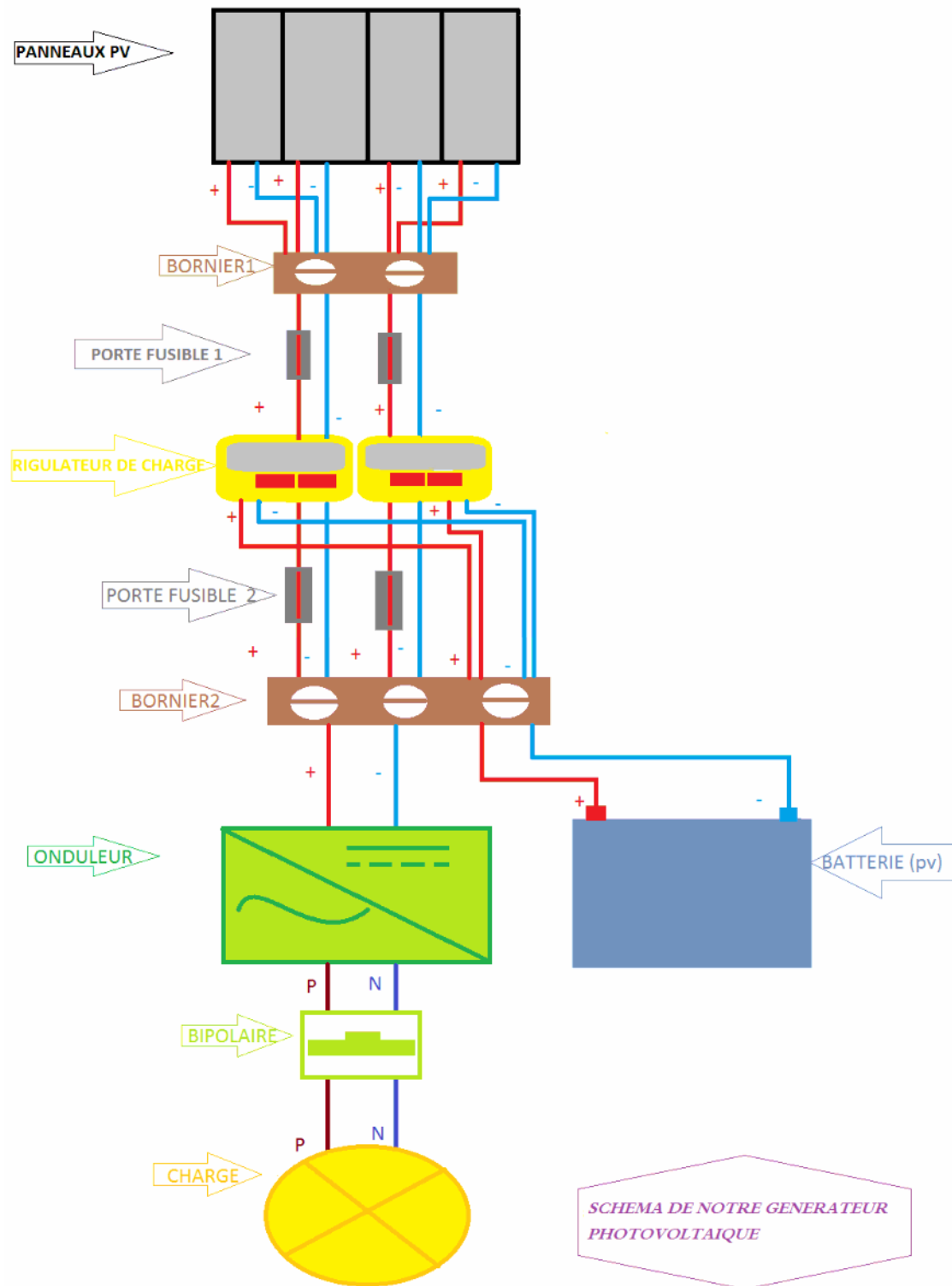


Figure 5.19 : Schéma de câblage de l'armoire du générateur PV

Le générateur est subdivisé en deux strings composé de deux modules en parallèle chacun. L'énergie est acheminée des strings vers deux régulateurs. L'utilisation de plusieurs étages de conversion peut améliorer le rendement de conversion et la fiabilité du système, selon [BAE05], en dissociant les fonctionnalités de l'onduleur. Souvent présenté comme une solution intermédiaire entre l'onduleur "central" et de l'onduleur "rangée", le hacheur "rangée", aussi appelé convertisseur multi-string, utilise un hacheur en bout de chaque string du système PV.

Après les régulateurs des rangées on alimente le bus continu et la batterie de stockage de l'énergie (générateurs autonome). L'onduleur de type central est alimenté à partir du bus continu. Des fusibles de protection sont insérés la borne plus de chaque panneau, chaque régulateur ainsi que celle du bus continu. L'onduleur de type central est protégé par un disjoncteur magnétothermique. Voir figure 5.19



Figure 5.20 : Armoire électrique du générateur PV

V.5.3 Caractérisation, essais et mesures du générateur PV

Pour la caractérisation de notre générateur PV, on faisait un essai par jour, la durée de ses essais est étalée sur trois jours. (voir figure 15.20)

a) Essais à vide avec variation l'orientation et l'inclinaison

Le premier jour on a fait les essais à 8h à 17h, en variant l'orientation et l'inclinaison. On relevait les courants, tensions, température, humidité et éclaircissement.

b) Essais à vide : Orientation fixe et inclinaison variable

Deuxièmes essais réalisés de 8h à 17h. L'angle de l'orientation est-ouest est fixé à 0 et l'angle de l'inclinaison est variable.

c) Essais en charge

Troisièmes essais on ajoute aux deuxièmes essais une charge de 225W pendant trois demi-heures 16h, 16h 30min, 17h.



Figure 5.21 : Générateur photovoltaïque en période d'essais

Résultats de mesures

V.5.3.1 Premier essai (, varie) à vide:

1) essais 30° :

$\alpha=30^\circ$	N°	horaire	(N):nuage				Beta=E-O		alpha:N-S		tension à vide	
			E(lux)	TETAc °C	H(%)	β^*	lcc1(A)	lcc2(A)	V1(v)	V2(v)	lccct(A)	Vt(v)
	1	8h	840	22,1	41,6	-60	8,4	8,5	21,1	21,3	16,9	21,2
	2	9h	830	32,6	20,9	-45	8	7,9	20,1	20,3	15,9	20,2
	3	10h	321(N)	24,5	46,1	-30	6,8	7,7	20,5	20,5	14,5	20,5
	4	11h	1263	42,4	11,8	-15	11,7	11,7	19,7	19,9	23,4	19,8
	5	12h	599(N)	43,3	9,9	0	7,49	4,7	19,3	19,5	12,19	19,4
	6	13h	1204	52,5	27,7	15	10,2	10,2	19,1	19,3	20,4	19,2
	7	14h	1147	52,6	27,3	30	10	10	19,3	19,5	20	19,4
	8	15h	1245	49,5	27,6	45	10,9	10,7	19,3	19,5	21,6	19,4
	9	16h	407(N)	45,9	9,7	60	6,3	6,4	19,3	19,5	12,7	19,4
	10	17h	263(N)	38,8	7,8	75	2,2	2,2	19,3	19,3	4,4	19,3

Tableau 5.3 : essais 30°

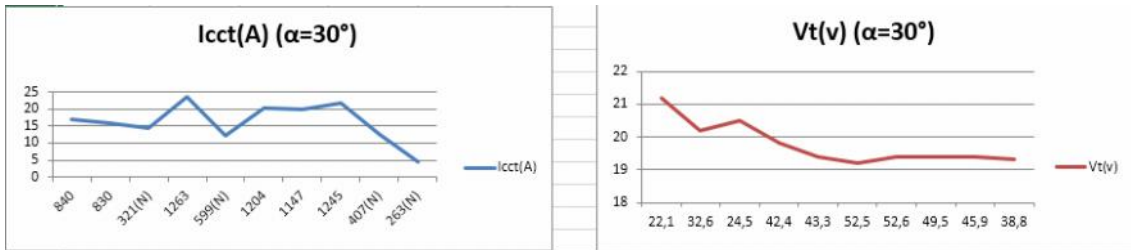


Figure 5.21 :Graphe1 : courant en fonction de l'éclairement I(E) Figure 5.22 : Graphe2 : tension en fonction de température V(T)

Avec :

I : courant de court-circuit(A)

V : tension à vide(v)

E : éclairement (lux)

T : température de la cellule PV (°c)

2) essais α=35° :

$\alpha=35^\circ$	N°	horaire	(N):nuage				Beta=E-O		alpha:N-S		tension à vide	
			E(lux)	TETAc °C	H(%)	β^*	lcc1(A)	lcc2(A)	V1(v)	V2(v)	lccct(A)	Vt(v)
	1	8h	883	24,1	35,2	-60	8,4	8,6	20,8	21,1	17	20,95
	2	9h	845	32,5	20,3	-45	8,2	8,2	20,1	20,3	16,4	20,2
	3	10h	1010	33,9	19,8	-30	10	10	20,4	20,7	20	20,55
	4	11h	1308	44,1	11,3	-15	11	11	19,1	19,3	22	19,2
	5	12h	820(N)	43,2	10,3	0	6,5	6,4	19,6	19,6	12,9	19,6
	6	13h	1248	51,9	27,4	15	10,4	10,2	19,1	19,3	20,6	19,2
	7	14h	1243	52,8	27,5	30	9,9	9,7	19	19,2	19,6	19,1
	8	15h	1071	48,6	9,9	45	10,5	10,8	19,5	19,7	21,3	19,6
	9	16h	660(N)	47,1	10,3	60	4,1	4,1	19,1	19,2	8,2	19,15
	10	17h	308(N)	38,9	6,6	75	2,9	2,6	19,4	19,4	5,5	19,4

Tableau 5.4 : essais 35°

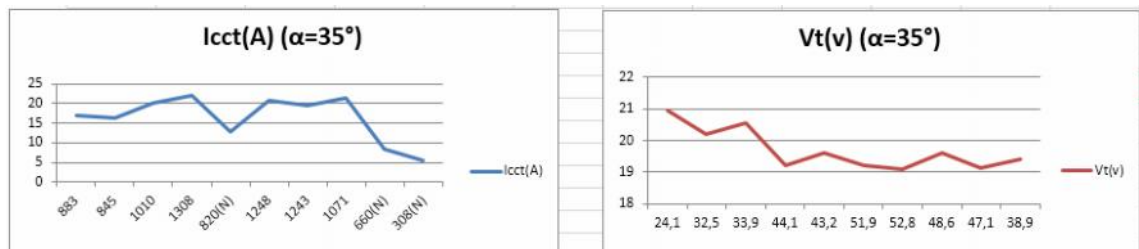


Figure 5.23: courant en fonction de l'éclairement I(E) Figure 5.24: tension en fonction de la température V(T)

D'après ses essais on a conclu qu'il y a deux facteurs essentiels qui influent sur le fonctionnement du panneau photovoltaïque :

Le premier facteur c'est l'éclairement autrement dit luminosité qui a un rapport avec le courant .plus l'éclairement augmente le courant augmente aussi.

Le deuxième facteur est la température de la cellule sur la tension à vide, plus la température augmente la tension chute.

V.5.3.2 Deuxième essais ($\alpha=0$, θ varie) à vide :

1) Essais 8h :

heure=8h	n°	E(lux)	Téta °Cc	H (%)	Téta °Ca	α (*rad)	I1	I2	V1	V2	Icct(A) à 8h	Vt à 8h(v)
	1	690	33,4	18,4	31	30	6	6	20,1	20,1	12	20,1
	2	699	32,1	18,4	34,9	35	6,1	6	20,2	20,1	12,1	20,15
	3	701	31,8	19	33,4	40	6,2	6,1	19,8	19,7	12,3	19,75
	4	702	32,3	19,9	37	45	6,3	6,3	19,7	19,8	12,6	19,75
	5	715	31,8	22	36,5	50	6,3	6,4	20,1	20,2	12,7	20,15
	6	730	31,4	19,3	38	55	6,9	6,9	20	20	13,8	20

Tableau5.5 : essais 8h

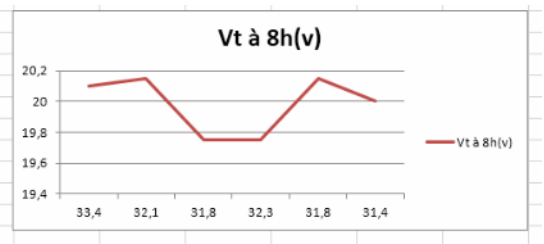
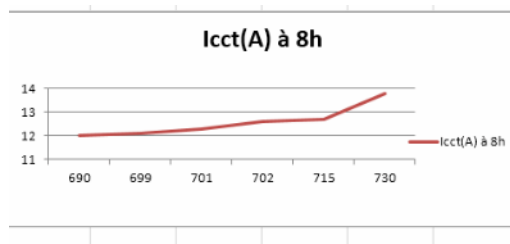


Figure 5.25 :: courant en fonction de l'éclairement I(E)

Figure 5.26 :: tension en fonction de la température V(T)

2) essais 9h :

heure=9h	n°	E(lux)	Téta °Cc	H (%)	Téta °Ca	α (*rad)	I1	I2	V1	V2	Icct(A) à 9h	Vt(v)
	1	701	29,8	19,4	31,5	30	6,5	6,3	20	20	12,8	20
	2	750	32	18	33	35	6,4	6,4	20	20	12,8	20
	3	732	32,4	18,5	32,7	40	6,9	6,9	20	20	13,8	20
	4	800	31,1	19	35	45	7	7,1	20,1	20,2	14,1	20,15
	5	739	31,8	21	34	50	7,1	7,1	20,1	20,3	14,2	20,2
	6	866	33	19,3	37,5	55	7,5	7,5	19,9	19,8	15	19,85

Tableau 5.6 : essais 9h

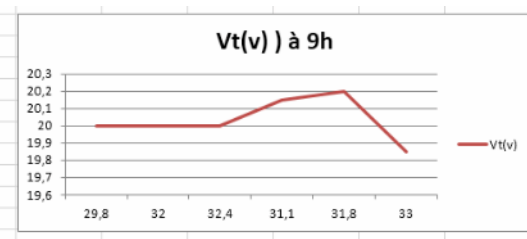
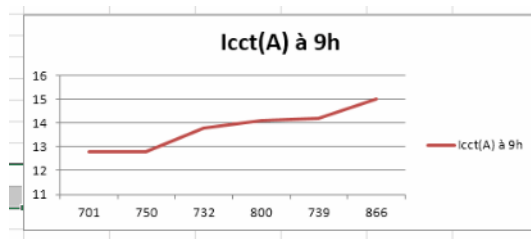


Figure 5.27 :: Courant en fonction de l'éclairement I(E) figure4.47 : Graphe 4 :

Figure 5.28 : tension en fonction de la température V(T)

3) essais 10h :

heure=10h	n°	E(lux)	Téta °Cc	H (%)	Téta °Ca	α (*rad)	icc1(A)	icc2(A)	V1	V2	icct(A) à 10h	Vt(v)
	1	890	33,4	18,4	31	30	8	8	20,1	20,2	16	20,15
	2	852	32,1	18,4	34,9	35	7,3	7,2	20,1	20,2	14,5	20,15
	3	818	31,8	19	33,4	40	7,2	7,1	20,2	20,4	14,3	20,3
	4	739	32,3	19,9	37	45	6,1	6	20,1	20,3	12,1	20,2
	5	715	31,8	22	36,5	50	6,1	6,1	20,1	20,3	12,2	20,2
	6	664	31,4	19,3	38	55	5,3	5,3	20,1	20,2	10,6	20,15

Tableau 5.7 : essais 10h

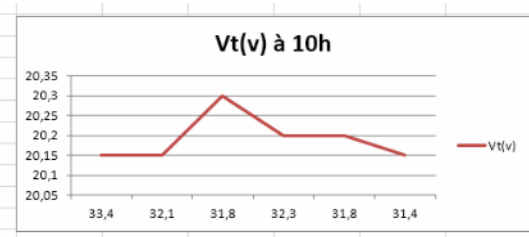
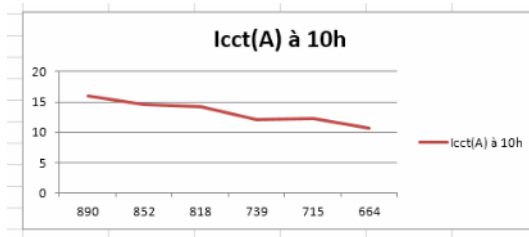


Figure 5.29 : courant en fonction de l'éclairement I (E)

Figure 5.30: tension en fonction de la température V (T)

4) essais 11h :

heure=11h	N°	E(lux)	TETAc °C	H (%)	TETAa °C	α (*rad)	icc1(A)	icc2(A)	V1(v)	V2(v)	icct(A) à 11h	Vt(v)
	1	1162	37,6	18,6	35	30	10,1	10,1	20	20,2	20,2	20,1
	2	1149	30,8	23,1	36,1	35	10,3	10,4	19,7	19,9	20,7	19,8
	3	1153	34,4	19,5	39,7	40	9,9	9,7	19,4	19,6	19,6	19,5
	4	1117	36,7	11	40,4	45	9,5	9,2	19,3	19,6	18,7	19,45
	5	1010	42,9	13,5	39	50	8,3	8,2	19,3	19,5	16,5	19,4
	6	939	42,6	13,7	36	55	7,8	7,7	19,4	19,6	15,5	19,5

Tableau 5.8: essais 11h

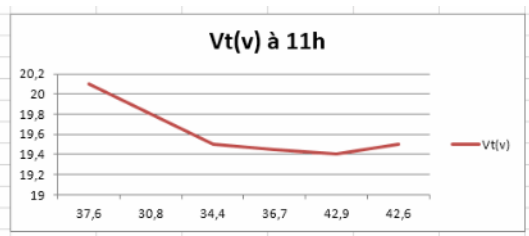
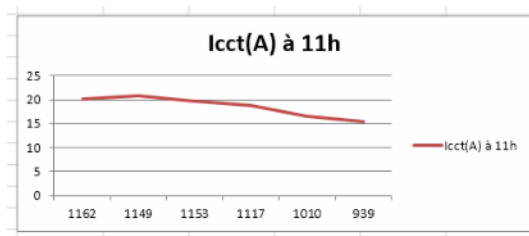


Figure 5.31: courant en fonction de l'éclairement I(E)

Figure 5.32: tension en fonction de la température V(T)

5) essais 12h :

heure=12h	N°	E(lux)	TETAc °C	H (%)	TETAa °C	α (*rad)	icc1(A)	icc2(A)	V1(v)	V2(v)	icct(A) à 12h	Vt(v)
	1	1230	43	12,8	36,5	30	10,7	10,7	19,6	19,7	21,4	19,65
	2	1206	42,5	12,6	38	35	10,4	10,2	19,6	19,7	20,6	19,65
	3	1181	42	13,5	30	40	10,4	10,1	19,7	19,7	20,5	19,7
	4	1050	42,3	13,1	34	45	9,8	9,6	19,7	19,8	19,4	19,75
	5	1115	42,5	12,9	36,1	50	9,7	9,5	19,5	19,6	19,2	19,55
	6	1055	41,9	13,5	35,8	55	8,9	8,9	19,4	19,5	17,8	19,45

Tableau5.9: essais 12h

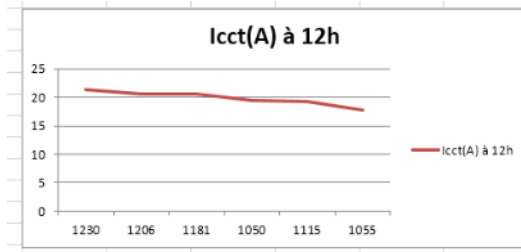


Figure 5.33 : Graphe 9 : courant en fonction de l'éclairement I(E)

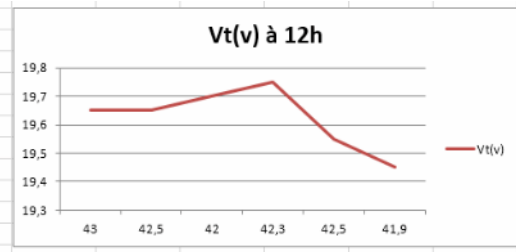


Figure 5.34 : tension en fonction de la température V(T)

6) essais 13h :

heure=13h	N°	E(lux)	TETAc °C	H(%)	TETAa °C	α (*rad)	Icc1(A)	Icc2(A)	V1(v)	V2(v)	Icct(A) à 13h	Vt(v)
	1	1244	46,8	11,1	41,8	30	10,2	10	19,1	19,2	20,2	19,15
	2	1237	47,3	11,4	36,5	35	10,5	10,4	19,1	19,2	20,9	19,15
	3	1220	47,8	11,5	39,8	40	9,8	9,8	19,1	19,2	19,6	19,15
	4	1191	47,8	11	44	45	9,8	9,6	19,1	19,2	19,4	19,15
	5	1136	45,2	11,5	42	50	9,2	9,2	19,2	19,3	18,4	19,25
	6	1108	46	11,7	39	55	9,3	9,1	19,2	19,3	18,4	19,25

Tableau 5.10: essais 13h

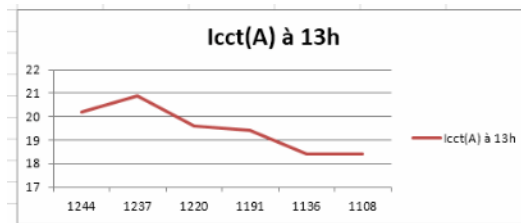


Figure 5.35 : courant en fonction de l'éclairement I(E)

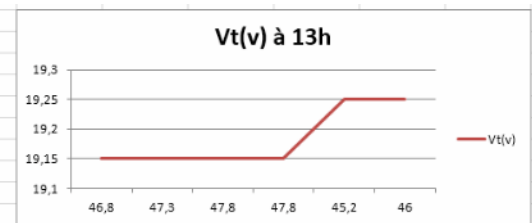


Figure 5.36: tension en fonction de la température V(T)

7) essais 14h :

heure=14h	N°	E(lux)	TETAc °C	H(%)	TETAa °C	α (*rad)	Icc1(A)	Icc2(A)	V1(v)	V2(v)	Icct(A) à 14h	Vt(v)
	1	1173	44,5	12,6	37,9	30	9,9	10	19,4	19,5	19,9	19,45
	2	1160	44,1	12,9	37	35	9,6	9,7	19,5	19,6	19,3	19,55
	3	1127	40,6	13,9	37,6	40	9,2	9,6	19,6	19,7	18,8	19,65
	4	1123	38,5	14,3	33,5	45	9,5	9,4	19,7	19,7	18,9	19,7
	5	1109	37,5	14,4	34	50	9,7	9,5	19,6	19,7	19,2	19,65
	6	1060	44	12,8	40,5	55	8,9	8,7	19,3	19,5	17,6	19,4

Tableau 5.11: essais 14h

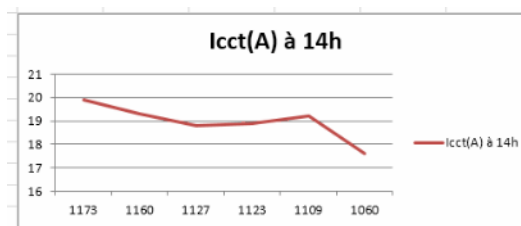


Figure 5.37: courant en fonction de l'éclairement I(E)

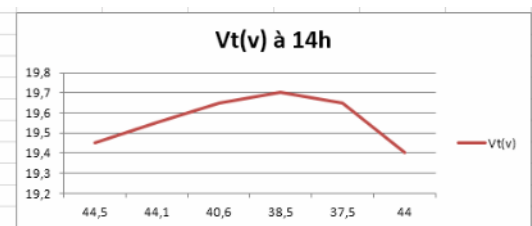


Figure 5.38: tension en fonction de la température V(T)

8) essais 15h :

heure=15h	N°	E(lux)	TETAc °C	H(%)	TETAa °C	α (*rad)	Icc1(A)	Icc2(A)	V1(v)	V2(v)	Icct(A) à 15h	Vt(v)
	1	1001	37,5	12,6	30,4	30	9,3	9,2	19,7	19,9	18,5	19,8
	2	1004	44	8,8	30,2	35	8,8	8,9	19,7	19,9	17,7	19,8
	3	992	44,6	8,7	33,1	40	9,2	8,9	19,6	19,6	18,1	19,6
	4	997	42,5	9,6	32,8	45	8,6	8,4	19,6	19,6	17	19,6
	5	967	44,8	8,5	34,5	50	8,7	8,6	19,7	19,7	17,3	19,7
	6	878	43,6	8,8	35,5	55	8,5	8,3	19,5	19,6	16,8	19,55

Tableau 5.12: essais 15h

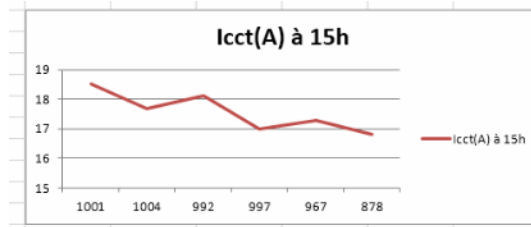


Figure 5.39: courant en fonction de l'éclairement I(E)

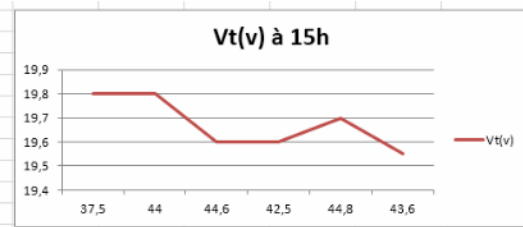


Figure 5.40: tension en fonction de la température V (T)

9) essais 16h :

heure=16h	N°	E(lux)	TETAc °C	H(%)	TETAa °C	α (*rad)	Icc1(A)	Icc2(A)	V1(v)	V2(v)	Icct(A) à 16h	Vt(v)
	1	875	40,9	10,6	30,9	30	8	7,8	19,8	20	15,8	19,9
	2	864	41,1	10,1	30,2	35	8	8	19,8	20	16	19,9
	3	846	41,2	10,5	10,8	40	7,6	7,4	19,8	20	15	19,9
	4	826	41,1	10,4	32,2	45	7,7	7,6	19,7	19,9	15,3	19,8
	5	800	40,7	10,9	30	50	7,2	7	19,8	20	14,2	19,9
	6	760	39,8	11,3	30,5	55	6,9	6,7	19,8	20	13,6	19,9

Tableau 5.13: essais 16h

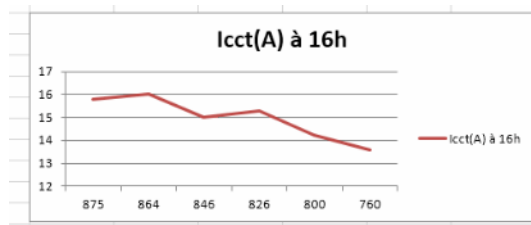


Figure 5.41: courant en fonction de l'éclairement I(E)

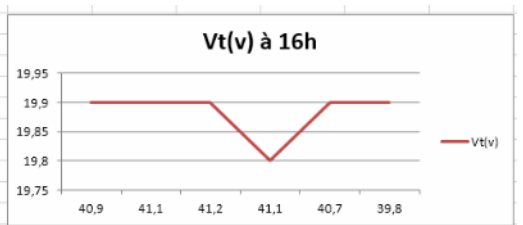


Figure 5.42: tension en fonction de la température V(T)

10) essais (17h) :

heure=17h	N°	E(lux)	TETAc °C	H(%)	TETAa °C	α (*rad)	icc1(A)	icc2(A)	V1(v)	V2(v)	icct(A) à 17h	Vt(v)
	1	592	35,8	13,4	2,9	30	5,5	5,4	20,1	20,3	10,9	20,2
	2	591	35,8	13,4	26,3	35	5,4	5,3	20,1	20,3	10,7	20,2
	3	591	36,7	12,7	28,6	40	5,6	5,5	20,1	20,3	11,1	20,2
	4	578	36,4	12,8	27,7	45	5,2	5,1	20	20,2	10,3	20,1
	5	565	36,9	2,5	27,4	50	5,3	5,1	20	20,2	10,4	20,1
	6	614	36,9	12,6	30,3	55	4,9	4,8	19,9	20,1	9,7	20

Tableau 5.14: essais 17h

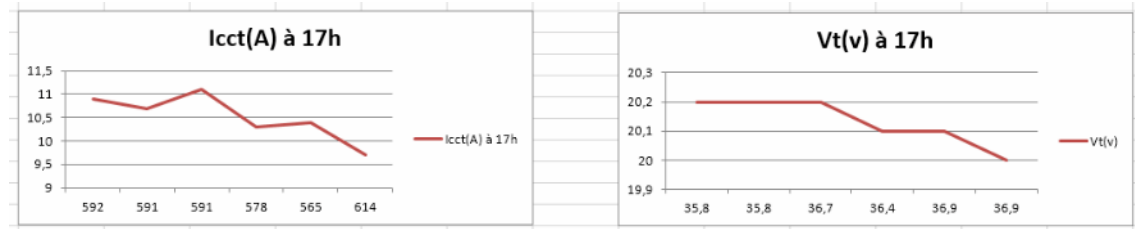


Figure 5.43: courant en fonction de l'éclairement I(E) Figure 5.44: tension en fonction de V(T)

Ces essais ont montré que l'angle d'inclinaison a aussi une influence sur le rendement du générateur (PV). D'après ces mesures l'angle optimal d'inclinaison est =35°.

V.5.3.3 Troisième essais (=0, varie) en charge

1) Essais 16h :

heure=16h	N	E(lux)	TETAo °C	H(%)	En charge		trois empoules de 75 W chacune								
					TETAa °C	α [rad]	icc1(A)	icc2(A)	V1(v)	V2(v)	icct(A)	Vt(v)	Ioh(A)	Voh(v)	Pt(w)
	1	878	41,7	12,2	37,8	30	8,2	8,1	19,6	19,6	16,3	19,6	1,01	229	231,29
	2	860	44,8	11,8	34,7	35	7,7	7,6	19,6	19,6	15,3	19,6	1	228	228
	3	833	34,4	11,9	36,4	40	7,4	7,3	19,5	19,6	14,7	19,55	1	228	228
	4	806	43,4	12	33,5	45	7,1	6,9	19,6	19,7	14	19,65	1,02	232	236,64
	5	760	43,3	12,4	38,8	50	6,7	6,6	19,5	19,7	13,3	19,6	1,02	233	237,66
	6	735	43,3	12,7	44,7	55	6,5	6,3	19,6	19,7	12,8	19,65	1	228	228

Tableau 5.15 : essais 16h

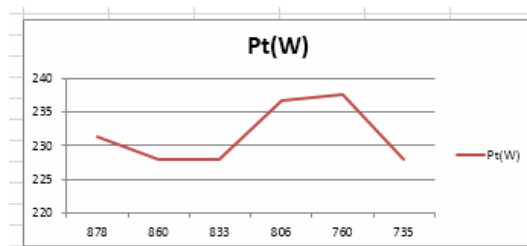


Figure 5.44: puissance en fonction de l'éclairement P(E)

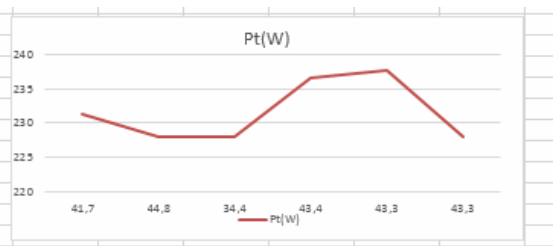


Figure 5.45: puissance en fonction de la température P(T)

Avec :

P : puissance apparente 'en charge' (w)

E : éclairement (lux)

T : température de la cellule PV (°c)

2) Essais 16h:30min :

heure=16h30	N°	E(lux)	TETAc °C	H(%)	TETAa °C	α (° rad)	Icc1(A)	Icc2(A)	V1(v)	V2(v)	Icct(A)	Vt(v)	Ich(A)	Vch(v)	Pt(W)
	1	716	37,2	13,4	35,2	30	6,7	6,6	20	20	13,3	20	228	1	228
	2	727	39,5	12,5	32	35	6,7	6,7	20	20	13,4	20	228	1	228
	3	727	40,7	12,5	32,2	40	6,6	6,5	19,8	19,9	13,1	19,85	229	1,01	231,29
	4	721	41,2	12,5	33,4	45	6,6	6,5	19,8	19,9	13,1	19,85	228	1,01	230,28
	5	704	40,8	12,5	37,5	50	6,3	6,2	19,7	19,8	12,5	19,75	228	1,01	230,28
	6	678	40	12,5	38	55	6,3	6,3	19,7	19,8	12,6	19,75	232	1,01	234,32

Tableau 5.16 : essais 16 :30

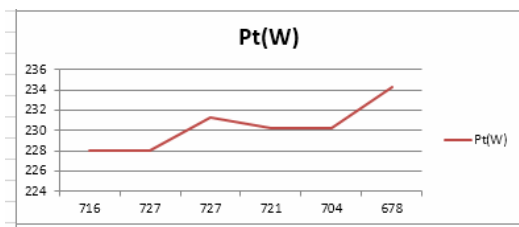


Figure 5.46 : puissance en fonction de l'éclairement P(E)

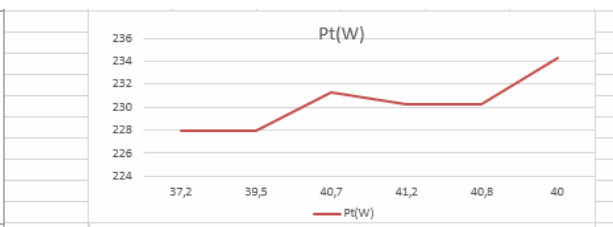


Figure 5.47 :: puissance en fonction de la température P(T)

3) Essais 17h :

heure=17h	N°	E(lux)	TETAc °C	H(%)	TETAa °C	α (° rad)	Icc1(A)	Icc2(A)	V1(v)	V2(v)	Icct(A)	Vt(v)	Ich(A)	Vch(v)	Pt(W)
	1	655	41,2	12,7	35	30	6,3	6,2	19,7	19,8	12,5	19,75	1,02	232	236,64
	2	646	41,3	13	34,7	35	5,9	5,8	19,7	19,8	11,7	19,75	1,01	228	230,28
	3	627	41,6	12,9	36	40	5,8	5,7	19,7	19,8	11,5	19,75	1,01	230	232,3
	4	596	41,4	13,2	38,3	45	5,3	5,3	19,7	19,8	10,6	19,75	1,01	228	230,28
	5	558	40,5	13,3	35,7	50	5	5	19,8	19,8	10	19,8	1,01	228	230,28
	6	543	38,4	14,3	36,3	55	4,8	4,8	19,8	19,9	9,6	19,85	1,01	228	230,28

Tableau 5.17 : essais 17h

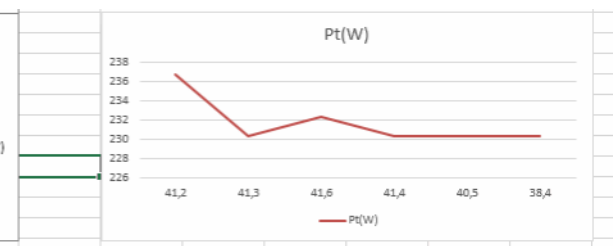
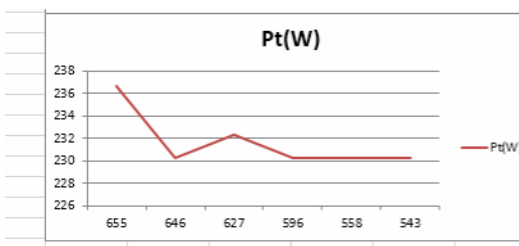


Figure 5.48: puissance en fonction de l'éclairement $P(E)$ Figure 5.49 : puissance en fonction de la température $P(T)$

Malgré qu'il y ait une variation dans l'ensoleillement (luminosité) la puissance est stable, sachant que la valeur de la charge n'a pas changé, ce qui prouve que le courant débité est en fonction de la charge.

V.6 Conclusion

La série de mesures faite durant le printemps 2014 a donné le raisonnement suivant :

Le courant dépend fortement de l'éclairement. Si l'éclairement augmente le courant augmente.

La tension dépend de la température. Pour une température de 25° on obtient la tension de circuit ouvert marqué sur le panneau. Si la température augmente la tension commence à diminuer.

L'angle d'orientation EST-Ouest influe grandement sur le courant et la puissance.

L'angle d'inclinaison Nord-sud influe beaucoup moins que l'orientation sur le courant et la puissance.

Un générateur suiveur du soleil a un rendement beaucoup plus important qu'un générateur fixe. Dans certaines conditions la différence peut atteindre 30 à 40%.

Conclusion générale

L'énergie Photovoltaïque connaît actuellement un fort développement dans le monde. En Algérie, il est prévu l'installation de 13575 MW à l'horizon 2030. Ce développement est dopé par les politiques internationales et nationales qui visent la diminution de l'utilisation des énergies fossiles selon les objectifs du protocole de Kyoto.

Par exemple, en Algérie, le gouvernement a mis en place plusieurs mesures pour développer l'industrie photovoltaïque. Ces aides ont pour but de rendre l'industrie du PV (PhotoVoltaïque) viable économiquement et compétitive face aux énergies fossiles. Ce panel de mesures a permis au marché du PV de connaître un développement exponentiel. L'explosion de l'industrie photovoltaïque est également mondiale. Dans ce développement, l'Europe joue un grand rôle. La puissance installée en Europe en 2002 était inférieure à 500MWc, en 2008 elle était supérieure à 9200 MWc, soit une multiplication par 18 en 6 ans.

En Algérie un mécanisme d'encouragement basé sur les tarifs d'achat garantis est mis en place par la réglementation. Ainsi, le producteur d'énergie renouvelable bénéficie de tarifs d'achat qui sont garantis pour une durée de 20 ans pour les installations en photovoltaïque et en éolien.

Les filières ne bénéficiant pas des tarifs d'achat garantis seront financées par le FNERC à hauteur de 50% à 90% du coût d'investissement selon la technologie et la filière retenues.

Les retombées de ce programme seront très significatives en termes de création d'emplois, d'industrialisation, de développement technologique et d'acquisition de savoir-faire, contribuant ainsi à la croissance et à la modernisation économique du pays ainsi qu'à la préservation de l'environnement.

L'énergie photovoltaïque est produite à partir du rayonnement solaire, via un composant électronique : la cellule photovoltaïque. La tension délivrée par le panneau solaire n'est pas constante car elle dépend de l'ensoleillement. Donc il est nécessaire de prévoir un régulateur de charge.

Les hacheurs ont différentes applications : par exemple le hacheur parallèle est utilisé dans des applications de faible tension comme les systèmes d'éclairage portatifs, ainsi dans des applications de grandes tensions dans les véhicules hybrides. Les hacheurs permettent d'avoir un rendement fiable de tension, il est par ailleurs possible d'abaisser la tension de l'alimentation ou l'élever selon l'utilisation (charge). L'allure des tensions et des courants dépend de la charge si elle est interrompue au ininterrompue.

La tension délivrée à la plupart des charges est de type alternatif. Il nous faut insérer un onduleur dans le cycle de conversion.

L'onduleur joue un rôle très important dans la conversion photovoltaïque. Son principal rôle est la conversion continue-alternative.

La commande symétrique donne une tension de type carré alternatif. La commande décalée offre la possibilité d'avoir un signal de type escalier. Pour une charge inductive le courant est de forme quasi-sinusoidale.

Actuellement on peut minimiser le poids des onduleurs en évitant les transformateurs en fer. Il y'a beaucoup de recherches orientées vers les transformateurs ferrites haute fréquence.

D'autres possibilités de réduire le poids des transformateurs ainsi que les distorsions du signal causées par les harmoniques sont offertes par les hacheurs types Boost et Sepic.

L'optimisation de l'énergie produite par les panneaux PV surtout par temps nuageux devient une nécessité absolue de nos jours. La méthode des plans d'expérience offre la possibilité d'optimiser les paramètres de position du générateur.

La série de mesures faite durant le printemps 2014 a donné au raisonnement suivant :

Le courant dépend fortement de l'éclairement. Si l'éclairement augmente le courant augmente.

La tension dépend de la température. Pour une température de 25° on obtient la tension de circuit ouvert marqué sur le panneau. Si la température augmente la tension commence à diminuer.

L'angle d'orientation EST-Ouest influe grandement sur le courant et la puissance.

L'angle d'inclinaison Nord-sud influe beaucoup moins que l'orientation sur le courant et la puissance.

Un générateur suiveur du soleil a un rendement beaucoup plus important qu'un générateur fixe. Dans certaines conditions la différence peut atteindre 30 à 40%.

Le générateur ainsi réalisé donne la possibilité de régler l'orientation selon le besoin et même à distance. De même l'angle d'inclinaison sa commande est motorisée et commandée à distance.

Perspectives

A titre de perspective nous suggérons en premier lieu le développement d'un suiveur solaire à un seul axe par exemple l'orientation à placer sur le générateur PV. Ceci permettra d'augmenter le rendement du générateur.

En second lieu l'étude du rayonnement réfléchi selon la surface du sol (neige, pluie, couleur du sol) afin de trouver l'angle d'inclinaison correspondant au meilleur rendement.

D'autres travaux peuvent être envisagés comme l'électrification du département de l'électrotechnique, la bibliothèque centrale aux panneaux solaires avec restitution au réseau de l'énergie restante.

L'étude du refroidissement des panneaux solaires est un axe de recherche important. Cela permettrait peut-être d'améliorer le rendement par baisse sensible de la température.

Références Bibliographiques

[01] **Zerhouni.F.Z**, «Adaptation optimale d'une charge à un générateur photovoltaïque», Mémoire de Magister, institut d'électronique, USTO, juin 1996.

[02] <http://WWW.niv-paris.fr:/écosystèmes/index-fr.htm>

[03] **Amri Mohamed** « Développement d'un banc de mesure à base d'un ordinateur pour un système photovoltaïque » Mémoire d'ingénieur d'état, Université de science et de la technologie Oran, juin 2004.

[04] **Daoud Omar et Khiloun Oud** Eude des cellules solaires » Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme des études universitaires (D.E.U.A) en électrotechnique 2005 /2006.

[05] **Lecheheb et Kelali** Régulation d'un système photovoltaïque à batterie » département d'électrotechnique, USTO, 2001.

[06] **Maouedj Rachid** « Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur le site de Tlemcen et Bouzareah» Mémoire de Magister, université Alger, 2005 /2006.

[07] www.abcelectronique.com

[08] **J.I.Rosell, M.Ibanez** « Modelling power output in Photovoltaic Modules for outdoors operating conditions »energy conversion & management December 2005.

[09] **A. Hamidat**, « Etude et simulation des performances réelles sur une longue période des systèmes de pompage photovoltaïque au fil du soleil », Mémoire de Magistère, CDER, 1989.

[10] **T. Fogelman**, « Système photovoltaïque pour les pays en développement, manuel d'installation et d'utilisation, Agence Française pour la Maîtrise de l'énergie, (AFME)

[11] **C. Bernard, J.Chauvin, D. Lebrun, J.F Muraz, P. Stassi** « Station solaire autonome pour l'alimentation des antennes de l'expérience de radio détection à l'Observatoire Pierre Auger».2006

[12] www.solarelectripower.org

[13] **Anne Labouret, Michel Viloz** « ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE» 3^e édition Dunod.

[14] «Le Stockage D'énergie »[Http. //www.solaire.org /information technique/total /stockage.htm](http://www.solaire.org/information_techinique/total/stockage.htm)

[15] « Batteries and Charge Control in Stand – Alone Photovoltaic Systems Fundamentals Application» **J. Dunlop & P.E** Sandia National Laboratories, January 1997.

[16] **Belhassani Mohamed** «Développement d'un régulateur de charge d'une batterie basé sur logique floue», Mémoire de Magister, USTO 2003.

- [17] **Belhadj Mohammed** «Modélisation d'un système de captage Photovoltaïque Autonome» Mémoire de Magister centre universitaire de Bechar Année 2007 /2008.
- [18] «Accumulateur Electrique» Grande Encyclopédie Librairie Larousse 1983.
Http. //www.esigge.ch/reche98/Batterie/Explication d.htm
- [19] **H.X young ,L,U,J. Burnett** «Weather data and probability analysis of hybrid PV wind power generation systems in Hong Kong » Renewable Energy 28(2003):1813 -1824.
- [20] « Batterie Pour Energie Renouvelable»
http. //www.hawker.invensys.com/farçais/pdf/dco802f0300.pdf
- [21] **D.liden** « Hand Book of Batteries», Mc GRAW HILL, ^{2^{em}} Edition, 1993.
- [23] **Philippe LETENNEUR**, les alimentations électriques, STS Granville 2003-2004
- [24] **Michel GIRARD** « Alimentations à découpage », Tome 1 — DUNOD, 2006.
- [25] TEXAS INSTRUMENT, « AN-1484 Designing A SEPIC Converter », SNVA168D– May 2006–Revised April 2008.
- [26] **Christophe PASQUIER & Michel JAMES** Dimensionnement des composants pour convertisseur SEPIC Polytechnique Clermont-Ferrand, France 2013
- [27] **http://www.ecomed21.org/article/potentiel-solaire**
- [28] **P. JEANTY**, «Onduleurs pour systèmes photovoltaïques autonomes et couplés au réseau de distribution». Rapport de stage Université de la réunion 2007-2008.
- [29] **BOUKLI Hacene Omar** «Conception et réalisation d'un générateur Photovoltaïque muni d'un convertisseur avec MPPT pour une meilleure gestion économique» Thèse de Doctorat Université Tlemcen **2011**.
- [30] **DAVID CHANEZ**, Onduleur monophasé de tension, Etude de l'onduleur de tension à 4 interrupteurs. 2012
- [31] **Watt, M., Passey, R. and MacGill, I.**, 2006, Photovoltaics research and development in Australia. International Journal of Environmental Studies. **63**, 777-790.
- [32] **Ting, D.**, 2010, The Dynamics of Energy: Supply, Conversion, and Utilization. International Journal of Environmental Studies, **67**, 959-961.
- [33] **Fouladi, F., Henshaw, P. and Ting, D.**, 2013, Special Issue: [Renewable Energies and Smart Grid - The Solution for Tomorrow's Energy](#) Enhancing Smart Grid realization with accurate prediction of photovoltaic performance based on weather forecast. International Journal of Environmental Studies, **70**, 754-764.
- [34] **Luque, A., Hegedus, S.**, 2003, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. John Wiley and Sons, Chichester.

- [35] **Reinoso, S., Carlos, R., Milone, D., Buitrago, H., Buitrago, R. and Roman, H.**, 2013, Simulation of photovoltaic centrals with dynamic shading, *Aplyed Energy*, **103**, 278-289.
- [36] Desertec WhiteBook., 2008, Clean Power from Deserts, 4th edition.
www.desertec.org/fileadmin/.../DESERTEC-WhiteBook_en_small.pdf
- [37] **Hani El-Nokraschy.**, 2012, Presentation at MENAREC conference, 15–16 May 2012.
- [38] **Ortiz-Conde, A., Francisco, J., Sánchez, G. and J. Muci**, 2006, New method to extract the model parameters of solar cells from the explicit analytic solutions of their illuminated I–V characteristics. *Solar. Energy Materiel and. Solar. Cells*, **90**, 352–361.
- [39] **Durisch, W., Struss, O. and Robert, K.**, 2000, Efficiency of selected photovoltaic modules under varying climatic conditions, *Renewable Energy*, **1**, 779-788.
- [40] **Kurnik, J., Jankovec, M., Brecl, K. and Topic, M.**, 2011, Outdoor testing of PV module temperature and performance under different mounting and operational conditions, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **95**, 373-376.
- [41] **Ikegami, T., Maezono, T., Nakanishi, F., Yamagata, Y. and Ebihara, K.**, 2001, Estimation of equivalent circuit parameters of PV module and its application to optimal operation of PV system, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, **67**, 389-395.
- [42] **Brett Crowther, M.R.**, 2008, Water, society and the future. *International Journal of Environmental Studies*, **65**, Special Issue: [Nitrogen deposition](#), 467-475.
- [43] **Potivejkul, S., Kinnares, V. and Rattanavichien, P.**, 1998, Design of Ozone Generator using Solar Energy. *IEEE Asia-Pacific Conference on Circuits and Systems. Microelectronics and Integrating Systems*, 217-220.
- [44] **Morent, R. and Leys, C.**, 2005, Ozone Generation in Air by a DC-Excited Multi-Pin-to-Plane Plasma Source. *Ozone Sciences and. Engineering*, **272**, pp 39-45.
- [45] **Moon, J. and Jung, J.**, 2007, Effective corona discharge and ozone generation from a wire-plate discharge system with a slit dielectric barrier. *Journal of Electrostatics*, **65**, 660-666.
- [46] **Nomoto, Y., Ohkubo, T., Kanazawa, S. and Adachi, T.**, 1995, Improvement of ozone yield by a silent-surface hybrid discharge ozonizer. *IEEE Transactions on Industry Applications*. **31**, 1458 - 1462.
- [47] **Frigon, N.L. and Mathews, D.**, 1996, *Practical Guide to Experimental Design*, 1st Edition, Willey, New York
- [48] **Tilmatine, A. and Dascalescu, L.**, 2010, Set-point identification of a free-fall triboelectrostatic separation process for plastic particles. *International Journal of Environmental Studies*, **67**, 27–40.
- [49] **Taguchi, G.**, 1987. *System of Experimental Designs*, Kraus International Publications, New York.
- [50] **Eriksson, L., Johansson, E., Kettaneh-Wold, N., Wikström, C. and Wold, S.**, 2000, *Design of Experiments: Principles and Applications*, Learnways AB, Stockholm.

- [51] MODDE5.0, 1999, User guide and tutorial. Umetrics.
- [52] Bulletin des énergies renouvelables CDER Bouzaréah, Algérie mars 2015
- [53] **Brahmi MN**, B.Soudani, MA.Senoussaoui, M.Brahmi. Caractérisation et validation par plan d'expérience d'un générateur photovoltaïque. 16 éditions des journées internationales de thermique. 13-15 novembre 2013 Marrakech, Maroc
- [54] **Stéphane VIGHETTI** Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion. Thèse de doctorat de l'Université de Grenoble. 10/2010
- [55] **MN.Brahmi**, S.Hadjeri, S.Nemmiche, M.Brahmi, A.Tilmatine. Experimental investigation of a PV solar generator for supplying water treatment process. International journal of environment studies. Vol 71, N° 1 pp 207-221 février 2015.
<http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00207233.2014.973667>
- [56] L.Nehari, **MN.Brahmi**, I.S.Bousmaha, M.Brahmi. Study and realization of a single-phase inverter based micro controller for photovoltaic system. 2nd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC'14) October 17-19, 2014 Ouarzazate, Morocco

Réalisation d'une unité de production d'énergie électrique solaire pour site isolé.

Résumé

De nos jours, les générateurs solaires sont généralement installés dans des lieux isolés où l'approvisionnement en énergie : ligne électrique ou transport de carburant, est malaisé, onéreux, voire impossible. Ces générateurs constituent alors des sources d'énergie rentables et fiables.

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre travail : la réalisation d'un générateur solaire pour site isolé.

Après le choix du site nous avons fait une simulation du générateur PV afin de mieux cerner les paramètres de dimensionnement. Après cela on est passé à la réalisation du générateur PV de 340 watts. Des essais sur terrain ont montré l'efficacité du générateur réalisé

Mots clés

Générateur Photovoltaïque, Hacheur, Onduleur, Inclinaison, Orientation, Soleil, Eclairage, Température

ملخص

انجاز وحدة إنتاج الطاقة الشمسية لخارج الشبكة

اليوم، وعادة ما تكون مثبتة على مولدات الطاقة الشمسية في المناطق النائية حيث امدادات الطاقة: خط كهرباء أو النقل بالوقود، من الصعب، ومكلفة أو مستحيلا. هذه المولدات وذلك يكلف مصادر فعالة وموثوقة للطاقة.

وفي هذا السياق بأن عملنا يناسب انجاز مولد للطاقة الشمسية لخارج الشبكة.

بعد اختيار الموقع قدمنا محاكاة لمولد الطاقة الشمسية من أجل فهم أفضل للمعايير التصميم. بعد ذلك ذهبنا إلى تحقيق المولد PV 340 واط. في الميدان وقد أظهرت التجارب فعالية المولد المنجز.

الكلمات المفتاحية

مولد الطاقة الضوئية، المروحية، قلاب، والميل، التوجه، والشمس، الإضاءة، درجة الحرارة.

Summary

Today, the solar generators are usually installed in remote locations where energy supply: power line or transportation fuel, is difficult, expensive or impossible. These generators are so cost effective and reliable energy sources.

It is in this context that our work fits: the realization of a solar generator for off-grid.

After site selection we made a simulation of the PV generator in order to better understand the design parameters. After that we went to the achievement of the PV generator of 340 watts. On Field trials have shown the effectiveness of the realized generator

Keywords

Photovoltaic Generator, chopper, inverter, incline, orientation, Sun, Illumination, Temperature