

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

*MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE*

Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen

Faculté de Technologie

N° attribué par la bibliothèque

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

*MEMOIRE DE FIN D'ETUDE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME
DE MASTER ACADEMIQUE*

Spécialité : « Electrotechnique »

Option : « Réseaux électriques et réseaux électriques intelligents »

préparé au Département de Génie Electrique et Electronique (GEE)

et présenté par

Ayyoub ABID et Yassine BECHLAGHEM

Intitulé du mémoire

**Etude et dimensionnement d'un convertisseur
SEPIC pour une application photovoltaïque**

sous la direction du Dr. Abdelkader MECHERNENE

soutenu publiquement le xx Juin 2017 devant la commission d'examen
composée de :

Année universitaire

Dedicaces 1

J_E dédie ce travail :

- *à mon père qui est toute ma gratitude, car c'est grâce à lui que j'ai atteint mon but ;*
- *à ma mère que je la remercie pour son soutien moral, ses encouragements et ses conseils qui m'ont guidés durant mon parcours ;*
- *à ma sœur Ryane et mon petit frère Yacine ;*
- *à ma grande mère, mes tantes, mes cousines et toute ma famille ;*
- *à tous mes amis(es) et spécialement pour Mekki ADDOU et Yacine MARIF qui m'ont beaucoup soutenu ;*
- *à tous mes collègues de travail Rachid, Brahim, Mohamed, Amine, Fayçal ;*
- *à mon binôme Yassine ;*
- *Enfin à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans ce travail.*

Ayyoub ABID
Tlemcen, le 15 juin 2017

Dedicaces 2

JE dédie ce travail :

- à mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie et aussi pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent ;
- à ma mère, qui a oeuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie ;
- à mon petit frère Abdou et mes sœurs Hasna, Meriem et Nacera, que Dieu les protège ;
- à mon meilleur ami Amine Seriari et tous mes amis, spécialement Addou Mekki et Abderrahim Baroudi pour les efforts et le fort soutien durant toute la période de préparation de ce travail ;
- à mon binome Ayyoub ;
- à toutes mes professeurs et mes camarades de la promotion 2016/2017 ;
- à tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la force de continuer.

Yassine Bechlaghem
Tlemcen, le 15 juin 2017

Remerciements

Avant tout, nous remercions Dieu le Tout-puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'études et que grâce à lui que ce travail a pu être réalisé.

Nous tenons en premier lieu à adresser nos remerciements à Monsieur BRIKCI NIGASSA Amine, Maitre assistant à l'Université Abou Bekr Belkaid, ait accepté de présider et d'honorer de sa présence dans le jury de soutenance du présent mémoire de Master. Qu'il trouve ici l'expression de notre reconnaissance et de notre profond respect.

Nous tenons également à remercier tout particulièrement le Docteur Abdelkader MECHERNENE, Maitre de conférences à l'Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, qui nous a encadrés durant tout le long de ce travail et pour sa disponibilité qui nous a permis de mener à bien cette maîtrise. Nous lui sommes reconnaissants pour la confiance dont il nous a fait preuve, pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail, malgré les charges qu'ils assument actuellement et pour ses précieux conseils qui nous ont permis une progression concrète dans ce projet.

Enfin, Nous sommes honorés que Monsieur Morad LOUCIF et Monsieur Boumediene YACOUBI, tout deux Maitre de Conférence à l'Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen d'avoir accepté d'évaluer ce travail en qualité d'examineurs.

Ayyoub ABID Yassine BECHLAGHEM
Tlemcen, le 15 juin 2017

TABLE DES MATIÈRES

DEDICACES 1	i
DEDICACES 2	ii
REMERCIEMENTS	iii
NOMENCLATURE	xi
GLOSSAIRE	xiv
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1 TECHNOLOGIE PHOTOVOLTAÏQUE	4
1.1 INTRODUCTION	5
1.2 EFFET PHOTOVOLTAÏQUE	5
1.2.1 Cellule photovoltaïque	6
1.2.1.1 Constitution d'une cellule	6
1.2.1.2 Différents types de cellules solaires	6
1.2.2 Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	7
1.2.3 Modèle d'une cellule photovoltaïques	8
1.2.4 paramètre des cellules photovoltaïques	8
1.2.4.1 Courant de court-circuit I_{cc}	8
1.2.4.2 Tension à circuit ouvert V_{co}	8
1.2.4.3 Rendement énergétique	8
1.2.4.4 Facteur de forme ff	9
1.3 GÉNÉRATEUR PHOTOVOLTAÏQUE	9
1.4 ASSOCIATION DES CELLULES PV	10
1.4.1 Association en série	10
1.4.2 Association en parallèle	10
1.4.3 Association hybride (série/parallèle) [10]	11
1.5 INFLUENCE DE L'ÉCLAIREMENT ET LA TEMPÉRATURE	11
1.6 POURSUITE DU POINT DE PUISSANCE MAXIMALE (MPPT)	13
1.6.1 Principe des commandes "Perturb and Observe (PO)"	14
1.6.2 Méthode de la conductance incrémentale	14
1.7 CONCLUSION	16
2 ETUDE DES CONVERTISSEURS ET STOCKAGE PAR BATTERIE	18
2.1 INTRODUCTION	19

2.2	CONVERTISSEURS STATIQUES	19
2.2.1	Définition	19
2.2.2	Fonctions de base et terminologie des convertisseurs statiques	20
2.3	CONVERTISSEURS DC-DC	21
2.3.1	Introduction	21
2.3.2	Définition	21
2.3.3	Convertisseurs DC-DC pour les systèmes d'énergie solaire	22
2.3.4	Types des convertisseurs DC-DC	22
2.3.4.1	Convertisseur Boost	24
2.3.4.2	Convertisseur Buck	29
2.3.4.3	Convertisseur Buck-Boost	32
2.3.4.4	Convertisseur Cuk	34
2.3.4.5	Convertisseur Sepic	37
2.4	CONVERTISSEURS DC-AC	40
2.4.1	Introduction	40
2.4.2	Principe de fonctionnement d'un onduleur	40
2.4.2.1	Onduleur Monophasé	41
2.4.2.2	Onduleur monophasé en pont (Pont H)	41
2.4.2.3	Onduleur triphasé	44
2.5	PUISSANCES DES CONVERTISSEURS	45
2.5.1	Définition	45
2.5.2	Puissance instantanée	45
2.5.3	Puissance active	45
2.5.4	Puissance apparente	46
2.6	STOCKAGE PAR BATTERIES	46
2.6.1	Introduction	46
2.6.2	Principe de fonctionnement	46
2.6.3	Caractéristique de la batterie	47
2.6.3.1	Résistance interne de l'accumulateur	47
2.6.3.2	Tension à vide	47
2.6.3.3	Tension nominale	48
2.6.3.4	Rendement	48
2.6.3.5	Tension de fin décharge	48
2.6.3.6	Capacité	48
2.6.3.7	Taux de décharge et recharge	48
2.6.3.8	Profondeur de décharge	48
2.6.3.9	Température	48
2.6.3.10	Durée de vie et nombre de jour d'autonomie	49
2.6.3.11	Énergie	49
2.6.3.12	État de charge de l'accumulateur	49
2.6.3.13	Circuit équivalent	50
2.6.4	Types d'accumulateurs	50
2.6.4.1	Accumulateur au plomb P b	50
2.6.4.2	Accumulateur Nickel-Cadmium Ni Cd	51
2.6.4.3	Accumulateur Nickel-Metal-Hydride Ni-MH	51

2.6.4.4	Accumulateur Li-ion	52
2.6.4.5	Autres batteries	53
2.7	CONCLUSION	53
3	ETUDE ET DIMENSIONNEMENT D'UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE SANS STOCKAGE	54
3.1	INTRODUCTION	55
3.2	ÉTUDE DES PARAMÈTRES ENVIRONNEMENTAL	55
3.2.1	Choix du site	55
3.2.2	Estimation de la consommation journalière	56
3.2.3	Estimation de l'ensoleillement	57
3.2.4	Calculer la puissance de l'installation	57
3.3	DIMENSIONNEMENT DES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES	58
3.3.1	Type des panneaux solaires utilisés	58
3.3.2	Caractéristiques des panneaux solaires utilisés	58
3.3.3	Calcul de nombre des panneaux nécessaire	59
3.3.4	Schéma du modèle SunPower305 sur Matlab	59
3.4	DIMENSIONNEMENT DES CONVERTISSEURS	62
3.4.1	Dimensionnement du Sepic	62
3.4.1.1	Dimensionnement des paramètres	62
3.4.1.2	Calcul numérique des paramètres	64
3.4.1.3	Schéma du Sepic sur Matlab	66
3.4.2	Dimensionnement du Buck-Boost	66
3.4.3	Dimensionnement de l'onduleur	67
3.4.3.1	Schéma de l'onduleur utilisé sur Matlab	67
3.4.3.2	Caractéristiques général d'un onduleur	67
3.4.4	Dimensionnement du stockage	68
3.4.4.1	Paramètres général d'une batterie	68
3.4.4.2	Calcul numérique des paramètres	69
3.5	CONCLUSION	69
4	SIMULATION NUMÉRIQUES ET INTERPRÉTATION	70
4.1	INTRODUCTION	71
4.2	VALIDATION DU SYSTÈME PV	71
4.3	VALIDATION DU DIMENSIONNEMENT DE SEPIC	72
4.4	VALIDATION DU DIMENSIONNEMENT DE BUCK-BOOST	73
4.5	VALIDATION DU DIMENSIONNEMENT DE L'ONDULEUR	74
4.6	VALIDATION DU MODÈLE DE STOCKAGE	75
4.6.1	État de charge	75
4.6.2	État de décharge	76
4.7	VALIDATION DU SYSTÈME PV SANS STOCKAGE	76
4.7.1	Test 1 : Éclairement fixe	77
4.7.2	Test 2 : Éclairement variable	78
4.8	VALIDATION DU SYSTÈME PV AVEC STOCKAGE	80
4.9	VALIDATION DU SYSTÈME PV AVEC ONDULEUR	81

4.10 CONCLUSION	81
CONCLUSION GÉNÉRALE	84
BIBLIOGRAPHIE	88
ANNEXE A : TITRE ANNEXE A	1
ANNEXE C : TITRE ANNEXE C	2

TABLE DES FIGURES

1.1	Effet photovoltaïque	6
1.2	Constitution d'une cellule [9]	6
1.3	Type de cellules photovoltaïques [5].	7
1.4	Modèle d'une cellule PV [10]	8
1.5	De la cellule au champ PV	9
1.6	Câblage des cellules dans un module.	10
1.7	Caractéristique du groupement en série des cellules identiques.	10
1.8	Caractéristique du groupement en parallèle de cellules identiques.	11
1.9	Caractéristique du groupement hybride des cellules identiques.	11
1.10	Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$	12
1.11	Influence de l'éclairement sur la caractéristique $P=f(V)$	12
1.12	Influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$	12
1.13	Influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$	13
1.14	Chaine élémentaire de conversion photovoltaïque.	14
1.15	Schéma du principe de la méthode de PO [17].	15
1.16	Algorithme PO	16
1.17	Schéma du principe de la méthode de CI	17
1.18	Algorithme d'incrément de la conductance	17
2.1	Différents types de convertisseurs	20
2.2	Réversibilité et non réversibilité des convertisseurs statiques	20
2.3	Schéma de convertisseur DC/DC	21
2.4	Tensions V_e et V_s dans le convertisseur DC/DC	22
2.5	Schéma de convertisseur « Boost »	24
2.6	Circuit équivalent pour T_{ON} [2]	25
2.7	Circuit équivalent pour T_{OFF} [2]	26
2.8	Forme du courant i_1 et i_2	26
2.9	Formes d'onde des courants et des tensions d'un convertisseur « Boost »	28
2.10	Schéma électronique de convertisseur abaisseur « Buck »	29
2.11	Convertisseur Buck Durant l'état ON	30
2.12	Convertisseur Buck durant l'état OFF	30
2.13	Formes d'onde des courants et des tensions d'un convertisseur « Buck »	31
2.14	Schéma de convertisseur inverseur « Buck-Boost »	32
2.15	Convertisseur Buck-Boost durant L'état ON	32

2.16	Convertisseur Buck-Boost durant l'état OFF	33
2.17	Formes d'onde des courants et des tensions d'un convertisseur « Buck -Boost»	34
2.18	Schéma de convertisseur inverseur « Cuk »	34
2.19	Circuit équivalent du convertisseur Cuk avec Q fermé	35
2.20	Circuit équivalent du convertisseur Cuk avec Q ouvert	36
2.21	Formes d'onde des tensions et des courants d'un convertisseur « Cuk »	37
2.22	Schéma de convertisseur inverseur « Sepic »	38
2.23	Convertisseur Sepic Durant l'état ON	39
2.24	Convertisseur Sepic Durant l'état OFF	39
2.25	Formes d'onde des tensions et des courants d'un convertisseur « Sepic»	40
2.26	Schéma de Principe d'un Onduleur Monophasé En Pont H	41
2.27	Schéma réel d'un onduleur en pont H	41
2.28	Tension aux bornes de la charge	42
2.29	Formes d'onde pour la commande symétrique	43
2.30	Courant et la tension aux bornes de la charge	44
2.31	Schéma de Principe d'un onduleur triphasé en pont	45
2.32	Couplage de convertisseur avec un récepteur	45
2.33	Principe de fonctionnement d'un accumulateur en charge et décharge	47
2.34	Modèle simplifié de l'accumulateur	50
3.1	Position souhaitée pour l'installation PV	55
3.2	Dimensions du panneau SunPower305	59
3.3	Modèle SonPower305 sur Matlab	60
3.4	Schéma bloc du GPV sous Matlab Simulink	61
3.5	Bloc du convertisseur Sepic sous Matlab	66
3.6	Schéma du modèle SIMULINK de hacheur Buck-Boost	66
3.7	Schéma de bloc de l'onduleur	67
4.1	Schéma du panneau utilisé	71
4.2	Caractéristiques $P(V)$	71
4.3	Caractéristiques $I(V)$	71
4.4	Schéma du convertisseur Sepic avec un générateur DC	72
4.5	Allures du courant et de tension de sortie	72
4.6	Bloc du convertisseur Buck-Boost	73
4.7	Tension de sortie du Buck-Boost	73
4.8	Bloc de l'onduleur utilisé	74
4.9	Tension et courant de l'onduleur	74
4.10	Schéma du batterie dans l'état de charge	75
4.11	Tension et Soc du batteie dans l'état de charge	75
4.12	Schéma du batterie dans l'état de décharge	76
4.13	Tension et Soc de la batterie dans l'état de décharge	76

4.14	Schéma du système PV sans stockage	77
4.15	Éclairement	77
4.16	Caractéristiques de tension et du courant d'entrée	78
4.17	Caractéristiques de tension et du courant de sortie	79
4.18	Puissance de sortie P_s	79
4.19	Niveaux d'éclairement journalière	80
4.20	Paramètres de sortie	81
4.21	Bloc de système PV avec stockage	82
4.22	Tension de sortie de Sepic et de Buck-Boost	82
4.23	Système PV avec onduleur	82
4.24	Paramètres de sortie de l'onduleurs	83
25	Caractéristiques du panneau SunPewer305	1
26	Modèle de la batterie utilisé	2

Nomenclature

Les principales notations et abréviations utilisées dans ce mémoire sont explicitées ci-dessous, sous leur forme la plus couramment employée dans le domaine du génie électrique.

Nom	Symbole	Unité
Accélération de la pesanteur	g	m/s^2
Capacité	C	F
Capacité de stockage	C_s	F
Capacité des batteries	C_b	Ah
Capacité d'une seule batterie	C_{bat}	Ah
Charge d'électron	q	C
Conductance	G	
Coefficient des pertes	K_p	
Constante de Boltzman	k	J/K
Courant de court circuit	I_{cc}	A
Courant	I	A
Courant des batteries	I_b	A
Courant d'entrée	I_e	A
Courant maximum	I_{max}	A
Courant minimum	I_{min}	A
Courant de saturation	I_0	A
Courant de sortie	I_s	A
Courant optimal	I_{opt}	A
Constante solaire	E	
Courant de saturation	I_{sat}	A
Définition photométrique du lumière	ph	
Diode	D	
Energié électrique	E_e	Wh/j
Energie consommé	E_c	Wh/j
Energie stocké	E_s	Wh/j

Paramètre

Nom	Symbole	Unité
Facteur d'idéalité de la diode	n	
Facteur de forme	ff	
Fréquence	f	Hz
Hauteur du soleil	h	
Inductance	L	H
Interrupteur de convertisseur	Q	
Irradiation	I_r	H
Latitude	θ	°
Longitude	$\phi,$	°
Numéro du jour	j	
Nombre de panneaux en série	N_s	
Nombre de batteries	N_b	
Nombre de panneaux en paallèle	N_p	
Nombre de panneaux	N_{pn}	
Niveau statique	N_s	m
Niveau dynamique	N_d	m
Ondulation du courant	δ_I	A
Ondulation du tension	δ_V	A
Puissance crête	W_c	W
Puissance	P	W
Puissance apparent	S	VA
Puissance maximal	P_{max}	W
Puissance de panneau	P_p	W
Profondeur de décharge	P_r	
Pèriode	T	s

Nom	Symbole	Unité
Photo-courant	I_{ph}	A
Rapport cyclique	α	
Rendement	η	
Rendement d'onduleur	η_{ond}	
Résistance	R	Ω
Résistance série	R_s	Ω
Résistance shunt	R_{sh}	Ω
Temps	t	s
Tension de la cellule	V_C	V
Tension d'entrée	V_e	V
Tension du générateur PV	V_{pv}	V
Tension optimal	V_{opt}	V
Tension de sortie	V_s	V
Température des cellule	T_{mod}	$^{\circ}$ K
Tension de circuit ouvert	V_{co}	V
Temps d'ouverture d'interrupteur	T_{ON}	s
Temps fermeture d'interrupteur	T_{OFF}	s

Glossaire

Acronyme	Signification
AC	Alternative Current
DC	Direct Current
GPV	Générateur Photovoltaïque
GTO	Gate Turn Off
Li-ion	Lithium Ion
MCC	Mode de condition continue
MPPT	Maximum Power Point Tracking
MPP	Power Point Maximum
MLI	Modelation de largeur d'impulsion
Ni-Cd	Nickel-Cadmium
Ni-MH	Nickel-Metal-Hydride
Pb	Plomb
PWM	Pulse Width Modelation
PO	Perturb end Observe
PV	Photovoltaïque
CSOC	Capacity State Of Charge
SOC	State Of Charge

Introduction générale

Aujourd'hui, la consommation énergétique mondiale est en très forte croissance dans toute la surface de notre planète. Il semble que tendanciellement, les consommations d'énergie vont continuer à augmenter, sous l'effet de la croissance économique d'une part, et de l'augmentation de la consommation d'électricité par habitant d'autre part, quels que soient les cas de figures envisagés. On parle périodiquement de diverses solutions techniques permettant de "continuer à vivre comme maintenant" sans que cela n'aggrave nos émissions de gaz à effet de serre, en attendant tranquillement que l'efficacité énergétique permette de diminuer les émissions. Mais il est important de savoir que l'on ne peut pas filtrer l'atmosphère pour en retirer le gaz déjà émis. La technique ne peut donc rien sur ce plan, et ne nous évitera pas un réchauffement programmé et inévitable d'au moins 1°C en un siècle. Souvent, la révolution des énergies renouvelables est avancée comme un dénouement à tous nos problèmes de production d'énergie électrique. Mais il serait plus raisonnable de voir ces nouvelles solutions techniques comme un simple frein au réchauffement climatique à condition que notre consommation énergétique ne continue pas d'augmenter exponentiellement. Cela éviterait ainsi de reproduire les mêmes erreurs du passé en pensant à des solutions "miracles" qui seraient inépuisables et sans impact sur notre mode vie ou sur l'environnement.

Chaque année la surface de la Terre reçoit du soleil à peu près 10 000 fois plus d'énergie que la planète en consomme. Il est donc important d'essayer d'en tirer profit. L'énergie photovoltaïque, basée sur la conversion du rayonnement électromagnétique solaire en électricité, représente l'une des ressources énergétiques renouvelables à part entière. Même si cette ressource est maintenant de mieux en mieux reconnue en tant que source potentielle d'énergie, cela n'a pas été facile face aux nombreux préjugés existants sur ce sujet. On a reproché par exemple à l'énergie solaire d'être intermittente (jour, nuit, saison), de ne pas être fiable et de dépenser plus d'énergie pour la conception d'un panneau solaire qu'il ne peut en fournir durant toute sa durée de vie. Ces affirmations sont en passe d'être aujourd'hui dénigrées par les progrès techniques accomplis sur les cellules photoélectriques mais également sur le traitement de l'énergie. Actuellement, la

plupart des panneaux photovoltaïques produisent l'énergie largement plus que l'énergie nécessaire à leur production au cours de leur vie.

L'électricité photovoltaïque présente une option économique intéressante pour des sites non raccordés au réseau de distribution centralisée. Lorsque les besoins à couvrir sont faibles, où l'absence d'une maintenance lourde constitue un avantage évident. Les systèmes photovoltaïques trouvent alors leur pleine justification dans les régions rurales isolées et les pays en voie de développement. Elle permet de couvrir les besoins en électricité d'une habitation, tels que l'éclairage, le pompage de l'eau et la production du froid, ...

De par sa situation géographique, l'Algérie, pays du soleil, bénéficie de conditions favorables pour la production et l'utilisation de l'énergie solaire d'origine photovoltaïque. En effet, l'introduction de ce type énergies peut être aisément envisagée sur de nombreux sites, vu son important potentiel solaire, notamment dans le grand sud, qui est caractérisé par de très fort apports solaires avec une différence de température diurne-nocturne très importante. Par conséquent, compte tenu de la baisse des revenus de la rente pétrolière et de l'importance de son gisement solaire, l'Algérie est condamnée à inscrire une nouvelle politique de reconversion énergétique comme perspective économique et géostratégiques dans les prochaines décennies.

Les convertisseurs DC-DC constituent une partie assez importante de la chaîne de conversion. Ils sont utilisés largement pour élevé les tensions et courants des panneaux photovoltaïques mais aussi dans les connexions à des batteries d'accumulateurs, les éoliennes, les systèmes hybrides. Ces convertisseurs servent à adapter la tension d'entrée d'un système par rapport à la tension de sortie désirée.

Dans notre travail, nous proposons l'étude et dimensionnement d'un convertisseur SEPIC pour une application photovoltaïque suivant un cahier de charge pour avoir des résultats bien définis.

Dans le début de ce manuscrit, nous avons donc voulu faire un bilan des différentes filières technologiques photovoltaïques afin de mieux comprendre les avancées et les perspectives à venir. et on a présenter un petit détail sur la poursuite de point de puissance connu sous l'appellation Maximum Power Point Tracking (MPPT) pour son intérêt à tirer le maximum de puissance d'un GPV.

Dans le deuxième chapitre, on étudie quelques types de convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Mais également les structures DC-AC essentiellement utilisées pour le couplage avec les réseaux électriques publiques. Ainsi qu'une petite présentation sur les différentes types d'accumulateurs existants pour le stockage d'énergie produite par le GPV.

Dans le troisième chapitre, est consacré à l'étude comparative expérimentale entre les différentes architectures de gestion photovoltaïque. Pour ce faire, dans un premier temps, nous avons réalisé des mesures journalières comparatives pour un site déterminé. Par la suite, nous avons fait un dimensionnement pour le panneau choisi, ainsi que nos convertisseurs utilisés.

Dans le quatrième chapitre, il est consacré pour les simulations de notre système photovoltaïque et l'interprétation de nos résultats de simulation.

Chapitre 1

Technologie photovoltaïque

SOMMAIRE

1.1	INTRODUCTION	5
1.2	EFFET PHOTOVOLTAÏQUE	5
1.2.1	Cellule photovoltaïque	6
1.2.2	Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	7
1.2.3	Modèle d'une cellule photovoltaïques	8
1.2.4	paramètre des cellules photovoltaïques	8
1.3	GÉNÉRATEUR PHOTOVOLTAÏQUE	9
1.4	ASSOCIATION DES CELLULES PV	10
1.4.1	Association en série	10
1.4.2	Association en parallèle	10
1.4.3	Association hybride (série/parallèle) [10]	11
1.5	INFLUENCE DE L'ÉCLAIREMENT ET LA TEMPÉRATURE	11
1.6	POURSUITE DU POINT DE PUISSANCE MAXIMALE (MPPT)	13
1.6.1	Principe des commandes "Perturb and Observe (PO)"	14
1.6.2	Méthode de la conductance incrémentale	14
1.7	CONCLUSION	16

1.1 Introduction

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière fournie par le soleil sous forme lumineuse en énergie électrique à travers des processus de conversion dits cellule photovoltaïque qui forment d'autres éléments appelés modules ou panneaux.

L'électricité solaire est une importante source d'énergie renouvelable qui pourrait être une alternative aux autres sources classiques afin de satisfaire les larges besoins d'énergie dans le futur. Cette énergie trouve tout son avantage dans des applications de petite et moyenne consommation dans des régions isolées et loin des lignes de distribution électrique [7].

En effet le mot " photovoltaïque " mot grecque vient de " photo "qui signifie lumière et de "voltaïque" qui tire son origine du nom d'un physicien italien Alessandro Volta (1754 -1827) qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité [15].

Il existe deux méthodes pour pouvoir convertir l'énergie solaire en électricité :

- Systèmes de conversion thermodynamique.
- Système directs, fondés sur les interactions physiques entre les photons de la radiation incidente et les électrons du matériau : l'effet photovoltaïque.

1.2 Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse (Photons) des rayons solaires en électricité, par le biais du déplacement de charges électriques dans un matériau semi-conducteur (Silicium).

Lorsque les photons heurtent une surface mince de ce matériau, ils transfèrent leur énergie aux électrons de la matière. Ceux-ci se mettent alors en mouvement dans une direction particulière, créant ainsi un courant électrique.

Le matériau semi-conducteur comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type N et dopée de type P. Les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement, et la zone initialement dopée P chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique [6].

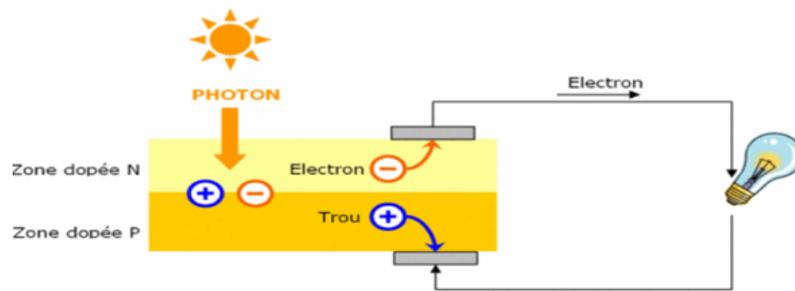


FIGURE 1.1 – Effet photovoltaïque

1.2.1 Cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est un élément de base dans un panneau solaire. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs généralement à base de Silicium et elle transforme l'énergie lumineuse en énergie électrique.

1.2.1.1 Constitution d'une cellule

- Une fine couche semi-conductrice .
- Une couche anti-reflet pour la pénétration maximal des rayons solaires.
- Une grille conductrice.
- Les plus récents possèdent une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants pour permettre à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement

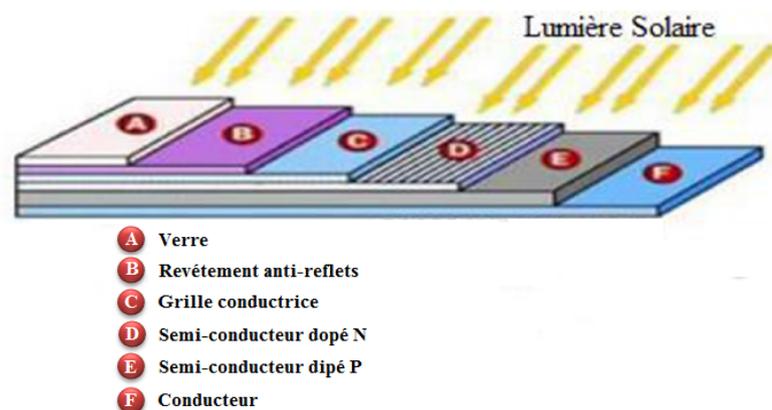


FIGURE 1.2 – Constitution d'une cellule [9]

1.2.1.2 Différents types de cellules solaires

Il existe plusieurs types de cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par un rendement et un coût qui lui sont propres. Parmi ces types de cellule on peut citer :

Cellules monocristallines

Elles ont un meilleur rendement (de 12 à 18% voir jusqu'à 24% en laboratoire)
Elles sont composées d'un silicium cristallisé en un seul cristal c'est pourquoi sa couleur est uniforme.

Cellules polycristallines

Leur rendement est plus faible (de 11% à 15% voir jusqu'à 19.8 en laboratoire),
elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé forme de cristaux multiples, on peut donc différencier les cristaux.

Cellules amorphes

Elles ont un faible rendement (de 5% à 8% voir jusqu'à 13% en laboratoire) mais elles ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé [9].

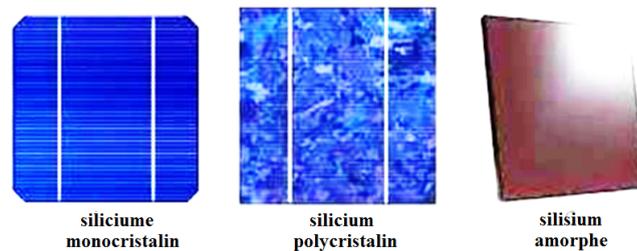


FIGURE 1.3 – Type de cellules photovoltaïques [5].

1.2.2 Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Le principe de fonctionnement de la cellule repose sur l'effet photovoltaïque qui converti directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité. Au voisinage de la jonction apparaît un champ électrique qui maintient la séparation des charges positives et négatives. Des contacts métalliques en formes de grille, contacts avant et arrière .

Une cellule photovoltaïque donc est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des paires d'électrons/trous dans le matériau semi-conducteur
- Collecte des particules générées dans le dispositif.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du cou-

rant : d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque.

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons / trous créés est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction P-N [3].

1.2.3 Modèle d'une cellule photovoltaïques

Ce modèle représente la cellule solaire comme source de courant qui modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique. La résistance montée en série représente la résistance de contact et de connexion, une autre résistance en parallèle dite la résistance shunt représente le courant de fuite. Une diode en parallèle qui modélise la jonction PN.

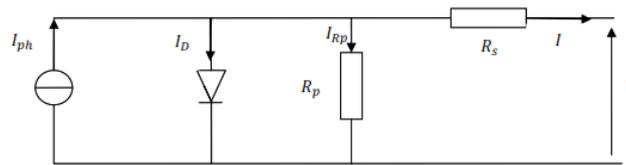


FIGURE 1.4 – Modèle d'une cellule PV [10]

1.2.4 paramètre des cellules photovoltaïques

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

1.2.4.1 Courant de court-circuit I_{cc}

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nul. Dans le cas idéal (R_s nulle et R_{sh} infinie), ce courant se confond avec le photo-courant I_{ph} .

$$I_{cc} = I_{ph} \quad (1.1)$$

1.2.4.2 Tension à circuit ouvert V_{co}

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

$$V_{co} = VT \cdot \ln((I_{ph}/I_{sat}) + 1) \quad (1.2)$$

1.2.4.3 Rendement énergétique

C'est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule $P_{max}(I_{opt}, V_{opt})$ et la puissance solaire incidente. Il est donné par :

$$\eta = (P_{max}/P_{inc}) = (I_{opt} \cdot V_{opt})/P_{inc} \quad (1.3)$$

Avec P_{inc} est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles. Ce paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

1.2.4.4 Facteur de forme ff

C'est le rapport entre la puissance maximale P_{max} fournie par la cellule ou générateur et la puissance optimale. Il représente la mesure de la qualité de la cellule ou d'un générateur, il est défini par la relation :

$$ff = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot V_{co}} = \frac{I_{opt} \cdot V_{opt}}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad (1.4)$$

1.3 Générateur photovoltaïque

La cellule photovoltaïque élémentaire est un petit générateur de très faibles puissances utilisées généralement pour des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés, délivre au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension de jonction PN). Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un panneau photovoltaïque. En effet, les modules PV sont composés d'un ensemble de cellules mises en série, réalisant la conversion proprement dite de la lumière du soleil en électricité. Ils sont eux-mêmes associés en série et parallèle pour former un champ photovoltaïque d'une puissance crête définie selon des conditions spécifiques d'éclairement, de température et de spectre solaire. La plupart des modules commercialisés sont constitués de deux à quatre réseaux de cellules en silicium cristallins connectés en série.



FIGURE 1.5 – De la cellule au champ PV

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

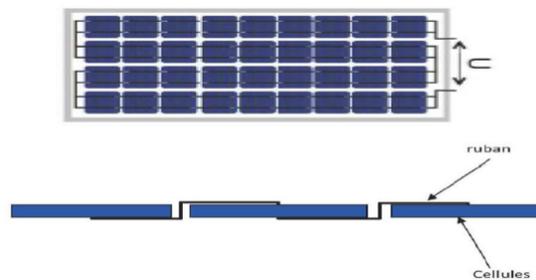


FIGURE 1.6 – Câblage des cellules dans un module.

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

1.4 Association des cellules PV

1.4.1 Association en série

Une association de cellules en série N_s permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque et donc accroître la puissance. Les cellules sont alors traversées pour le même courant et la caractéristique résultant du groupement en série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule.

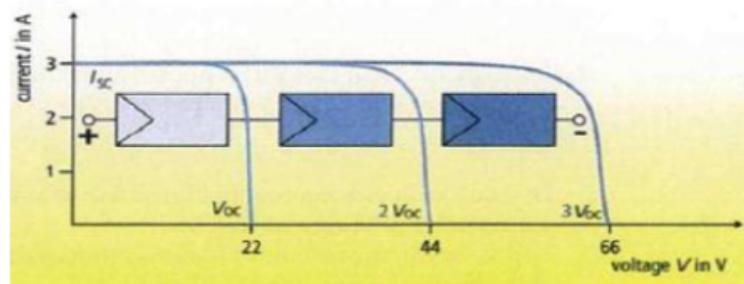


FIGURE 1.7 – Caractéristique du groupement en série des cellules identiques.

1.4.2 Association en parallèle

Une association de cellules en parallèle N_p permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectés en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants.

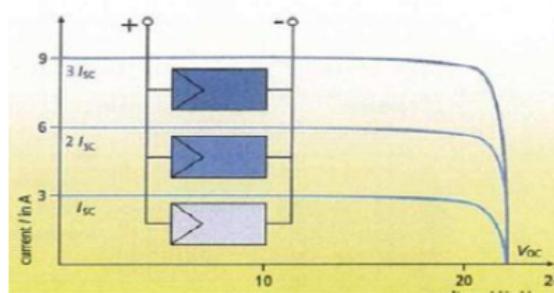


FIGURE 1.8 – Caractéristique du groupement en parallèle de cellules identiques.

1.4.3 Association hybride (série/parallèle) [10]

L'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit total et de la tension à vide totale sont données par les relations :

$$I'_{cc} = N_p \cdot I_{cc}$$

$$V'_{co} = N_s \cdot V_{co}$$

La figure 1.9 montre la caractéristique résultante obtenue en associant, en série N_s et en parallèle N_p des cellules identiques.

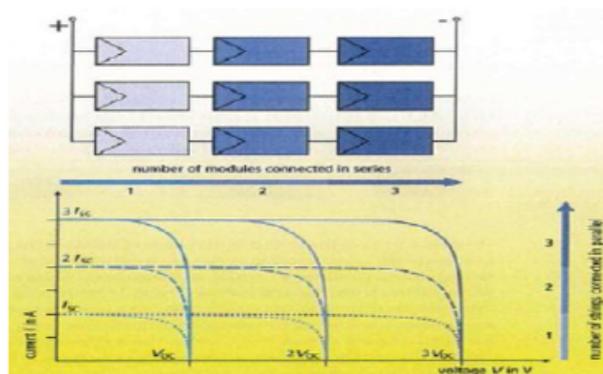
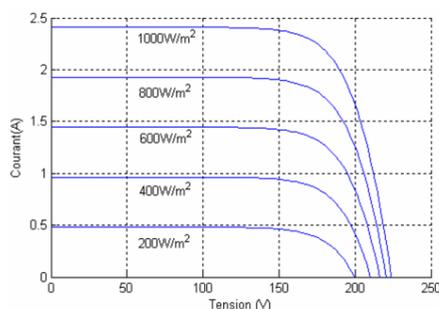


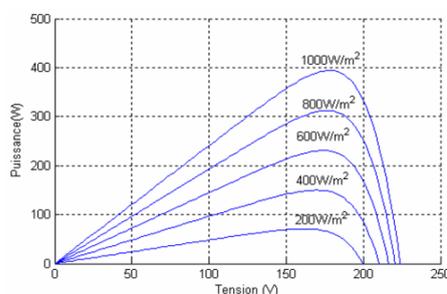
FIGURE 1.9 – Caractéristique du groupement hybride des cellules identiques.

1.5 Influence de l'éclaircement et la température

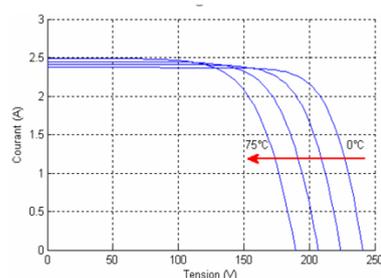
La figure 1.10 montre l'influence de l'éclaircement sur la caractéristique $I = f(V)$. A une température constante, on constate que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement. Car le courant de court circuit est une fonction linéaire de l'éclaircement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique.

FIGURE 1.10 – Influence de l'éclairément sur la caractéristique $I=f(V)$

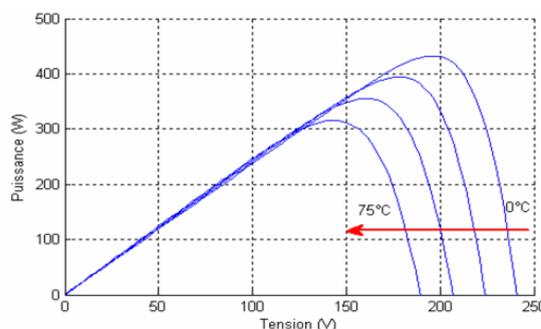
La figure 1.11 illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairément, ce qui nous permet de déduire l'influence de l'éclairément sur la caractéristique $P(V)$.

FIGURE 1.11 – Influence de l'éclairément sur la caractéristique $P=f(V)$

La figure 1.12 montre l'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$. Le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension de circuit ouverte. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution.

FIGURE 1.12 – Influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$

La figure 1.13 illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs de la température, ce qui nous permet de déduire l'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$.

FIGURE 1.13 – Influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$

1.6 Poursuite du Point de Puissance Maximale (MPPT)

Des méthodes de commandes spécifiques existent pour amener des dispositifs à fonctionner à des points maximums de leurs caractéristiques sans qu'a priori ces points soient connus à l'avance, ni sans que l'on sache à quel moment ils ont été modifiés ni qu'elles sont les raisons de ce changement. Pour le cas de sources énergétiques, cela se traduit par des points de puissance maximale. Ce type de commande est souvent nommé dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou bien « **Maximum Power Point Tracking** » en anglo-saxon (MPPT). Le principe de ces commandes est d'effectuer une recherche du point de puissance maximal (PPM) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance.

La figure 1.14 représente une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque élémentaire associée à une commande MPPT. Pour simplifier les conditions de fonctionnement de cette commande, une charge DC est choisie. Comme nous pouvons le voir sur cette chaîne, la commande MPPT est nécessairement associée à un quadripôle possédant des degrés de liberté qui permettent de pouvoir faire une adaptation entre le GPV et la charge. Dans le cas de la conversion solaire, le quadripôle peut être réalisé à l'aide d'un convertisseur DC-DC de telle sorte que la puissance fournie par le GPV corresponde à la puissance maximale (P_{MAX}) qu'il génère et qu'elle puisse ensuite être transférée directement à la charge. La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement qu'elles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir à tout moment. Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV. Une synthèse des principaux modes de recherche du PPM existants et les points qu'il restait à améliorer ont été présentée [17].

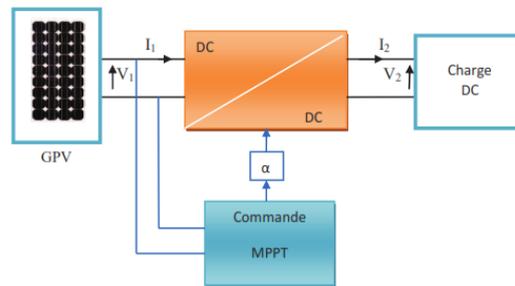


FIGURE 1.14 – Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.

1.6.1 Principe des commandes "Perturb and Observe (PO)"

La méthode perturbation et observation 'P&O', est la plus utilisée, car son algorithme est facile à implémenter et elle donne un bon résultat. Comme son nom l'indique ce processus fonctionne par une perturbation du système en augmentant ou en diminuant la tension de fonctionnement du module puis l'observation du comportement de la variation de puissance du panneau qui en résulte, mais il présente des oscillations autour du MPP et il peut diverger à l'évolution rapide des conditions atmosphériques, aussi le temps de calcul dépend aux conditions initiales.

La figure 1.15 montre le principe de l'algorithme PO. Premièrement, le courant et la tension du générateur photovoltaïque sont détectés à un point puis la puissance est calculée correspondant à ce point. Si la puissance est supérieure à sa valeur précédente alors la puissance augmente (>0) dans cette direction le point de fonctionnement se déplace vers son point de puissance maximale et la tension est perturbée par augmentation ce qui signifie que le rapport cyclique du convertisseur a été augmenté. Mais si la puissance tirée du générateur photovoltaïque est inférieure à celle de précédente (<0) alors le point de fonctionnement se déplace loin de la puissance maximale, la tension est alors perturbée dans le sens inverse en diminuant la tension pour la diminution du rapport cyclique. Si la valeur de puissance est la même que la précédente ($P=0$) alors le point de puissance maximum est atteint [10] [14].

La figure représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type PO, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension) sont nécessaires pour déterminer la puissance du GPV à chaque instant.

1.6.2 Méthode de la conductance incrémentale

La méthode d'incrémental de la conductance a été proposée pour éviter les inconvénients de la méthode PO de recherche du MPP.

Cette méthode fonctionne à l'aide de deux capteurs de tension et de courant qui détecte la tension et le courant de sortie du générateur photovoltaïque. Elle

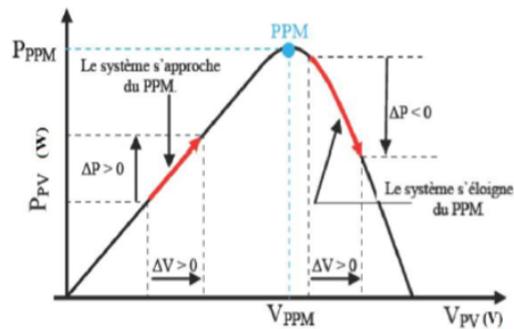


FIGURE 1.15 – Schéma du principe de la méthode de PO [17].

est basée sur le fait que le point de puissance maximale (MPP) n'est atteint si la dérivé (dP/dV) de la courbe de puissance du panneau est nulle, positif à gauche et négative à droite. La puissance du panneau solaire est donnée par : $P=IV$ La dérivé partielle dV/dP est donnée par [14] :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \quad (1.5)$$

$$\frac{1}{V} \frac{dP}{dV} = \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV} \quad (1.6)$$

On définit la conductance de la source $G = I/V$ et l'incrémentale conductance $\Delta G = dI/dV$.

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dV} > 0 & \quad \text{ou} \quad \frac{dI}{dV} > -\frac{1}{V} & \quad \text{à gauche de MPPT} \\ \frac{dP}{dV} < 0 & \quad \text{ou} \quad \frac{dI}{dV} < -\frac{1}{V} & \quad \text{à droite de MPPT} \\ \frac{dP}{dV} = 0 & \quad \text{ou} \quad \frac{dI}{dV} = -\frac{1}{V} & \quad \text{au MPPT} \end{aligned}$$

L'algorithme de la méthode de conductance incrémental est présenté dans la figure 1.18 :

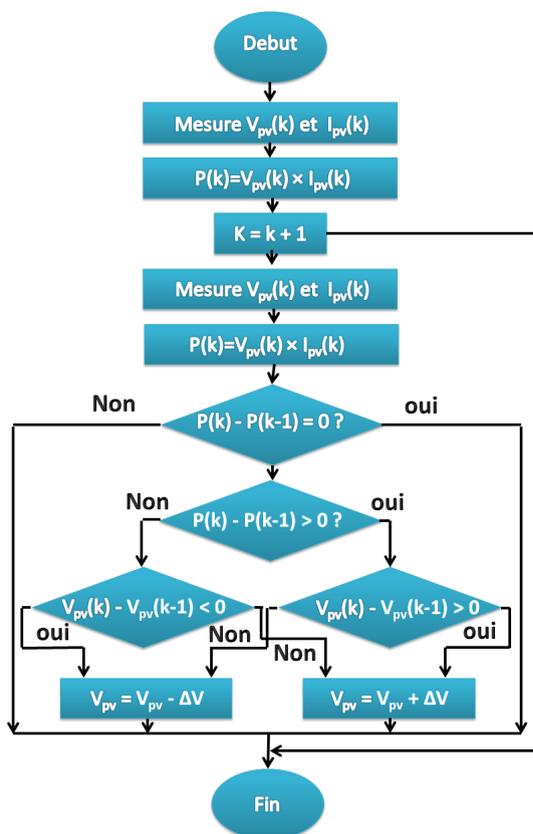


FIGURE 1.16 – Algorithme PO

1.7 Conclusion

Les énergies renouvelables présentent actuellement un intérêt majeur dans la recherche scientifique, du fait qu'elles présentent une alternative aux énergies fossiles polluante. Le caractère inépuisable de l'énergie solaire lui confère un avenir prometteur. Notre étude s'est axée autour de la compréhension du fonctionnement de cette technologie, autrement dit la transformation de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Les méthodes d'extractions du point maximal et la notion du rendement ont été pris en compte dans la suite du mémoire. L'utilisation de cellule en série et en parallèle sera réalisée, avec l'implémentation de l'algorithme perturbations et observations. Il nous reste à modéliser un convertisseur permettant de faire le lien entre les panneaux et une charge. Avec tous ces éléments, on aura un ensemble qui permettra d'extraire le maximale de puissance des panneaux connectés entre eux.

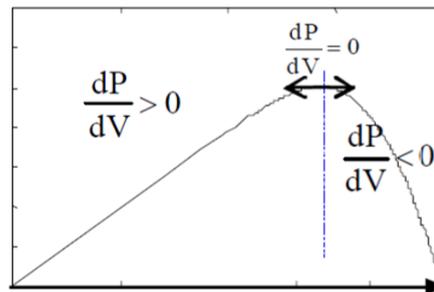


FIGURE 1.17 – Schéma du principe de la méthode de CI

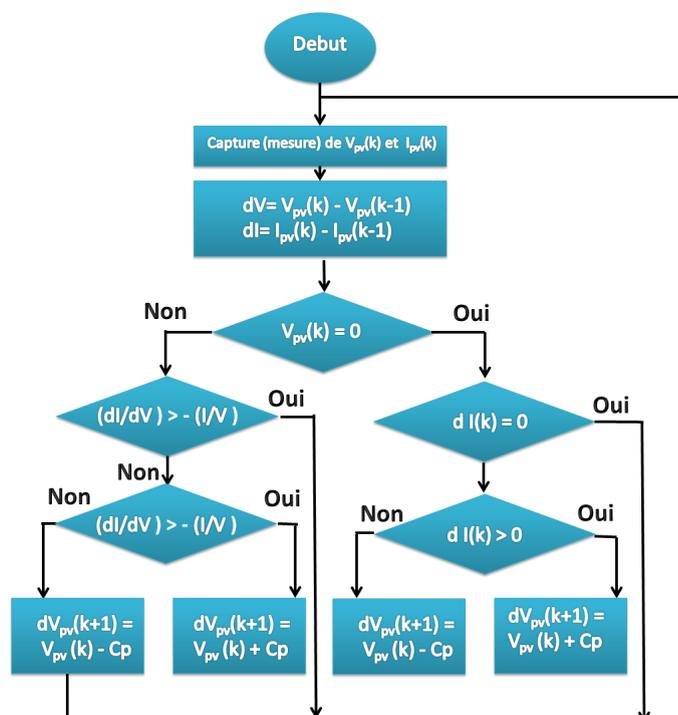


FIGURE 1.18 – Algorithme d'incrément de la conductance

Chapitre 2

Etude des convertisseurs et stockage par batterie

SOMMAIRE

2.1	INTRODUCTION	19
2.2	CONVERTISSEURS STATIQUES	19
2.2.1	Définition	19
2.2.2	Fonctions de base et terminologie des convertisseurs statiques	20
2.3	CONVERTISSEURS DC-DC	21
2.3.1	Introduction	21
2.3.2	Définition	21
2.3.3	Convertisseurs DC-DC pour les systèmes d'énergie solaire	22
2.3.4	Types des convertisseurs DC-DC	22
2.4	CONVERTISSEURS DC-AC	40
2.4.1	Introduction	40
2.4.2	Principe de fonctionnement d'un onduleur	40
2.5	PUISSANCES DES CONVERTISSEURS	45
2.5.1	Définition	45
2.5.2	Puissance instantanée	45
2.5.3	Puissance active	45
2.5.4	Puissance apparente	46
2.6	STOCKAGE PAR BATTERIES	46
2.6.1	Introduction	46
2.6.2	Principe de fonctionnement	46
2.6.3	Caractéristique de la batterie	47
2.6.4	Types d'accumulateurs	50
2.7	CONCLUSION	53

2.1 Introduction

En électrotechnique, les systèmes utilisés permettent souvent de transformer la nature de l'énergie électrique et de la convertir en une autre forme d'énergie (mécanique, thermique, etc.). Ces systèmes de l'électrotechnique traditionnelle (machines tournantes, éclairage, chauffage) ne peuvent pas toujours être reliés directement à une source électrique. Il faut alors avoir recours à un dispositif, jouant le rôle d'interface, qui permettant d'adapter, de transformer les caractéristiques de la source et d'introduire des moyens de réglage de transfert d'énergie afin d'assurer le bon fonctionnement.

2.2 Convertisseurs statiques

2.2.1 Définition

Les convertisseurs statiques sont des dispositifs, à base de semi-conducteurs, qui sont capable de transformer de l'énergie électrique disponible en une forme appropriée pour alimenter une charge, principalement par modifier la tension et/ou la fréquence de l'onde électrique (amplitudes, fréquences, phases).

Cette transformation est, à l'heure actuelle, effectuée par des systèmes complexes, réalisés à partir de composants électroniques utilisés comme interrupteurs.

On distingue deux types de sources de tension :

- Sources de tension continues caractérisées par la valeur V de la tension.
- Sources de tension alternatives définies par les valeurs de la tension efficace V et de la fréquence f [2].

Selon le sens on peut classer les convertisseurs sous deux catégories :

- **Convertisseurs unidirectionnels :**

Ils répondent à diverses charges embarquées telles que des capteurs, des commandes, des équipements de divertissement, d'utilité et de sécurité.

- **Convertisseurs bidirectionnels :**

Ils sont utilisés dans les endroits où la batterie de charge et de freinage par récupération est nécessaire. Le flux de puissance dans un convertisseur bidirectionnel est habituellement d'une extrémité de basse tension telle qu'une batterie ou un super condensateur à une partie haute tension, appelé opération Boost. Pendant le freinage par récupération, la puissance retourne au basse tension pour recharger les batteries en mode Buck.

2.2.2 Fonctions de base et terminologie des convertisseurs statiques

L'énergie électrique est disponible soit sous forme alternative (réseau de distribution électrique, alternateurs) soit sous forme continue (batterie d'accumulateurs, génératrice à courant continu, cellules photovoltaïques,...). Parallèlement avec ça, la charge peut nécessiter une alimentation en alternatif ou en continu. Pour cela on note donc quatre fonctions de base des convertisseurs statiques (figure 2.1).

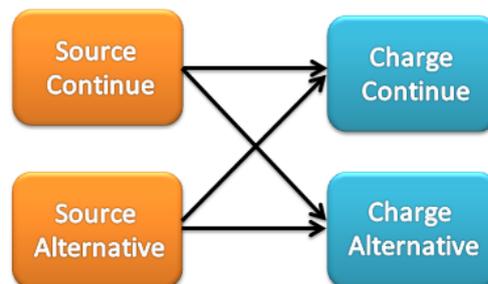


FIGURE 2.1 – Différents types de convertisseurs

Prenant en considération le sens de transition, on peut classer les convertisseurs statiques selon deux catégories (figure 2.2) :

- **les convertisseurs réversible** : lorsque l'énergie, peut transit de manière bidirectionnelle, c'est à dire aussi bien dans un sens que dans l'autre. Les notions d'entrée et de sortie ne sont alors plus évidentes.
- **les convertisseurs non réversibles** : transfèrent l'énergie uniquement d'une source vers une charge utilisatrice [2].

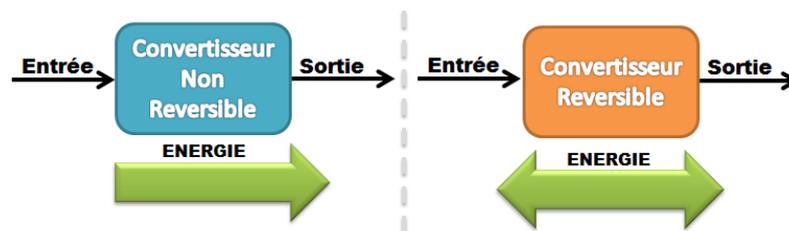


FIGURE 2.2 – Réversibilité et non réversibilité des convertisseurs statiques

2.3 Convertisseurs DC-DC

2.3.1 Introduction

Par objectif, le présent chapitre traite de la conversion DC/DC (continue-continue) qui a pour but de contrôler l'écoulement de l'énergie entre le panneau solaire et la charge (figure 2.3). Les convertisseurs continu-continu sont devenus une composante essentielle des applications industrielles et militaires au cours des dernières décennies. Grâce à leurs rendements de plus en plus élevés, leurs faibles encombrements ainsi que leurs poids et coûts réduits, ils ont remplacé les alimentations classiques linéaires, même pour de faibles niveaux de puissance. Un convertisseur de puissance peut être caractérisé comme un système périodique, non-linéaire et variant au cours du temps en raison de son fonctionnement basé sur le découpage. La topologie des éléments dynamiques du système dépend de l'état instantané de chaque interrupteur commandé, ce qui rend la modélisation complexe [17].

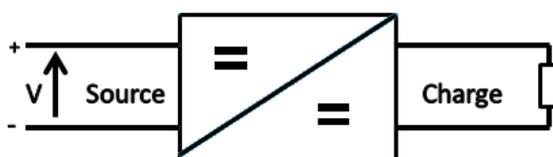


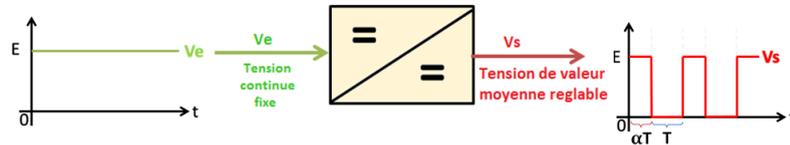
FIGURE 2.3 – Schéma de convertisseur DC/DC

La gamme de puissance que l'on peut traiter pour ce type de convertisseur s'étend de quelques watts, à des centaines de kilowatts. Cependant, l'apparition de composants de puissance sans cesse plus performants, permet d'envisager le traitement de puissances plus élevées [19].

2.3.2 Définition

On peut définir les hacheurs comme étant les convertisseurs statiques qui permettent le transfert de l'énergie électrique d'une source continue vers une autre source continue (figure 2.4), ils sont l'équivalent des transformateurs en alternatif. Autrement dit un hacheur permet d'obtenir une tension continue de valeur moyenne réglable à partir d'une source de tension continue fixe (batterie d'accumulateurs ou bien pont redresseur -muni d'un filtre LC- alimenté par le réseau de distribution).

Le cas où l'entrée et la sortie sont de natures dynamiques différentes, on parle de hacheur à liaison directe, on peut alors les relier directement. Lorsqu'elles sont de même nature dynamique, dans ce cas on parle de hacheur à accumulation, et il faut faire appel alors à un élément de stockage momentané. Enfin dans le cas où l'isolation galvanique de la sortie avec l'entrée est une nécessité, on réalise des hacheurs dits isolés.

FIGURE 2.4 – Tensions V_e et V_s dans le convertisseur DC/DC

Suivant le degré de réversibilité que l'on désire, la structure du montage diffère, et suivant la puissance nominale du système, la technologie des composants ne sera pas la même.

2.3.3 Convertisseurs DC-DC pour les systèmes d'énergie solaire

Un hacheur peut être réalisé à l'aide d'interrupteur électronique commandable à l'ouverture et à la fermeture tels que les thyristors GTO ou les transistors bipolaire ou à effet de champ à grille isolée fonctionnant en régime de commutation (tout ou rien). Le principe du hacheur consiste à établir puis interrompre périodiquement la liaison source- charge à l'aide de l'interrupteur électronique. Celui-ci doit pouvoir être fermé ou ouvert à volonté afin d'avoir une tension de sortie continue réglable. Pour cela 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 [17].

2.3.4 Types des convertisseurs DC-DC

Les convertisseurs DC-DC sont de plusieurs topologies. Ils sont classés par catégorie selon la topologie isolée ou non isolée.

- Les topologies isolées de la source :

Elles sont très employées souvent dans les alimentations à découpage, et qui emploient un transformateur d'isolement fonctionnant à haute fréquence. Les topologies les plus connues dans la majorité des applications sont le Flyback, en demi-point et en pont complet. Dans les applications photovoltaïques (PV), les systèmes de couplage avec le réseau électrique emploient souvent ces types de topologies quand l'isolement électrique est préféré pour des raisons de sûreté.

- Les topologies non isolées de la source :

Ne comportent pas de transformateurs d'isolement. Elles sont généralement utilisées dans l'entraînement des moteurs à courant continu. On peut classer les convertisseurs de type non isolées selon le niveau de tension de sortie sous trois catégories principales :

- Convertisseur élévateur « Boost ».
- Convertisseur abaisseur « Buck »
- Convertisseur abaisseur-élévateur « Buck-Boost ».

comme on peut ajouter aussi :

- Convertisseur «Cuk».
- Convertisseur «Sepic» [7].

Par rendement on peut classer ces convertisseur par rapport a leurs rendement dans le tableau ce dessous (Tableau 2.1).

convertisseur	Rendement du convertisseur (%)	Batterie
Buck	93	12 v
Boost	92	24 v
Buck-Boost	92	12-24 v
Cuk	89	12 v
SEPIC	78.1	24 v

TABLE 2.1 – Rendement des quelques convertisseurs DC-DC [19]

La topologie Buck est employée pour les faibles tensions. Dans les applications PV, le convertisseur Buck est habituellement employé comme chargeur de batteries et dans des systèmes de pompage de l'eau.

La topologie Boost est employée pour augmenter la tension. Les systèmes de production de l'énergie emploient un convertisseur Boost pour augmenter la tension de sortie au niveau du service avant l'étage de l'onduleur. Puis, il y a des topologies capables d'augmenter et de diminuer la tension telles que le Buck-Boost, le Cuk, et le Sepic. Les convertisseurs DC-DC peuvent être vus comme des transformateurs DC-DC.

Le tableaue 2.2 résume les principaux rapports de transformation en fonction du rapport cyclique pour les différentes structures de convertisseurs statiques avec et sans isolement galvanique. Où α désigne le rapport cyclique du convertisseur [7].

Convertisseur	Rapport de transformation en fonction de α	Isolement galvanique
Buck	α	non
Boost	$\frac{1}{1-\alpha}$	non
Buck-Boost	$\frac{-\alpha}{(1-\alpha)}$	non
Cuk	$\frac{-\alpha}{(1-\alpha)}$	non
SEPIC	$\frac{\alpha}{(1-\alpha)}$	non

TABLE 2.2 – Rapports de transformation des principaux convertisseurs DC-DC [7]

2.3.4.1 Convertisseur Boost

- **Définition**

Un convertisseur Boost, ou hacheur parallèle, est une alimentation à découpage permet d'augmenter la tension fournie et diminuer ainsi, le nombre d'éléments nécessaires pour atteindre le niveau de tension désiré. Donc les systèmes de production de l'énergie emploient un convertisseur Boost pour augmenter la tension de sortie au niveau du service avant l'étage de l'onduleur [12].

- **Schéma du convertisseur Boost**

Le convertisseur survolteur est le plus populaire des convertisseurs pour les régulateurs de correction du facteur de puissance, ce convertisseur est caractérisé par le fait que de la tension de sortie est supérieure à la tension d'entrée (figure 2.5)

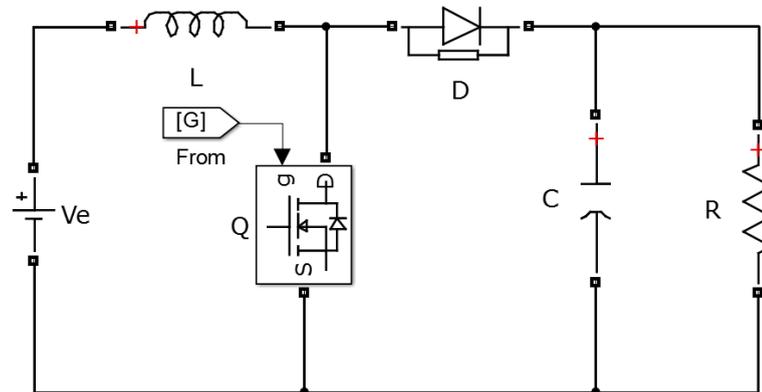


FIGURE 2.5 – Schéma de convertisseur « Boost »

- **Principe de fonctionnement**

Le fonctionnement d'un convertisseur Boost peut être divisé en deux phases distinctes selon l'état de l'interrupteur Q :

Mode continu : (Une phase d'accumulation d'énergie) : Lors de l'état passant lorsque l'interrupteur Q est fermé, 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.

Mode discontinu : Lorsque l'interrupteur Q est ouvert, l'inductance se trouve alors en série avec le générateur et sa f.e.m s'additionne à celle du générateur (effet survolteur). Le courant traversant l'inductance traverse ensuite la diode, le condensateur et la charge. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité [12].

Alors, le fonctionnement du circuit peut se diviser en deux parties selon l'intervalle de commutation (T_{ON} , T_{OFF}).

- **Pour T_{ON} (Q fermé) :** À $t = 0$, quand le transistor Q est fermé, l'intervalle T_{ON} commence. Le courant d'entrée, qui s'élève, traverse l'inductance L et le transistor. (figure 2.6)

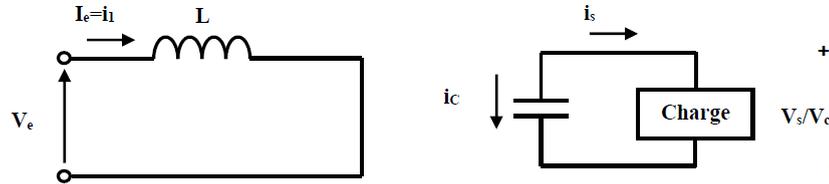


FIGURE 2.6 – Circuit équivalent pour T_{ON} [2]

L'équation de la tension : Durant l'état passant, l'interrupteur Q est fermé, entraînant l'augmentation du courant suivant la relation :

$$V_e = L \frac{di}{dt} \quad (2.1)$$

sachant que $V_e = V_{PV}$

L'équation du courant : a la fin de l'état passant, le courant i_L a augmenté selon l'équation :

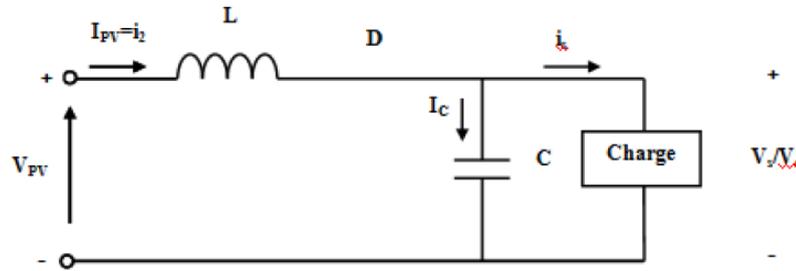
$$i_L = \int \frac{V_e}{L} dt \quad (2.2)$$

$$i_{1L} = \frac{\alpha V_e}{L} t \quad (2.3)$$

où i_{1L} est le courant à l'instant initial. Pendant cet intervalle le courant traversant l'inductance augmente.)

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

- **Pour T_{OFF} (Q ouvert) :** L'intervalle T_{ON} commence quand on ouvre le transistor Q à $t = t_1$. Le courant de l'inductance diminue car l'énergie emmagasinée dans l'inductance L est transférée à la charge (figure 2.7).

FIGURE 2.7 – Circuit équivalent pour T_{OFF} [2]

L'équation de la tension : Pendant l'état bloqué, l'interrupteur Q 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.

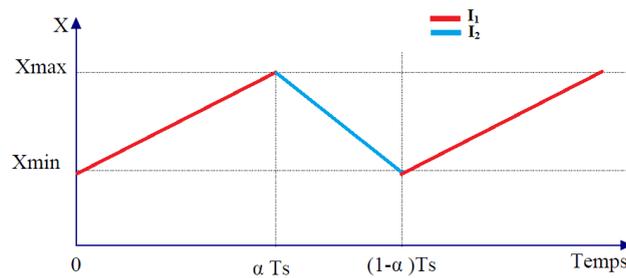
$$V_e - V_s = L \frac{di}{dt} \quad (2.4)$$

L'équations du courant :

$$i_{2L} = \int \frac{V_e - V_s}{L} dt \quad (2.5)$$

$$i_{2L} = \frac{(\alpha - 1)(V_e - V_s)t}{L} \quad (2.6)$$

Les deux équations des courants i_{1L} et i_{2L} sont interprétées dans la (figure 2.8)

FIGURE 2.8 – Forme du courant i_1 et i_2

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 :

$$E = \frac{1}{2} L i^2 \quad (2.7)$$

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 :

$$i_{ON} + i_{OFF} = 0 \quad (2.8)$$

En remplaçant et par leurs expressions i_{ON} et i_{OFF} , on obtient :

$$\frac{\alpha V_e}{L} t + \frac{(1 - \alpha)(V_e - V_s)}{L} t = 0 \quad (2.9)$$

Ce qui peut se réécrire de la façon suivante :

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{1}{1 - \alpha} \quad (2.10)$$

En mode de conduction continue la période de commutation est $T = T_{ON} + T_{OFF}$ et le rapport cyclique :

$$\alpha = \frac{T_{ON}}{T} \quad (2.11)$$

On peut faire varier la tension de sortie du convertisseur en changeant la valeur du rapport cyclique α . La tension de sortie est minimale quand $\alpha=0$. On ne peut pas avoir $\alpha=1$ qui correspondrait à un Q toujours fermé ; pour α proche de 1, la tension de sortie devient très grande et très sensible au changement du rapport cyclique α . De plus l'influence des pertes dans le circuit limite la tension maximale de sortie du convertisseur.

Le gain en tension tend théoriquement vers l'infini pour un rapport cyclique unitaire si nous considérons le circuit sans pertes. Ainsi, en résumé nous pouvons exprimer la tension et courant de sortie en régime établi selon :

$$V_s = \frac{V_e}{1 - \alpha} \quad (2.12)$$

$$I_s = (1 - \alpha)I_e \quad (2.13)$$

Grâce à l'expression 2.10, on peut voir que la tension de sortie est toujours supérieure à celle d'entrée (le rapport cyclique variant entre 0 et 1), et que théoriquement elle peut être infinie lorsque α se rapproche de 1. C'est pour cela que l'on parle de survolteur [2].

Pour la fréquence de découpage f , on en déduit l'ondulation de courant dans l'inductance et l'ondulation de la tension de sortie :

$$\Delta I_L = \frac{\alpha \times V_s}{L \times f} \quad (2.14)$$

$$\Delta V_s = \frac{\alpha \times I_s}{C \times f} = \frac{\alpha \times V_e}{(1 - \alpha) \times R \times C \times f} \quad (2.15)$$

Le courant dans l'inductance est fonction de la puissance débitée par la source. On peut exprimer sa valeur moyenne en fonction du courant moyen dans la charge et du rapport cyclique

$$I_L = \frac{I_s}{(1 - \alpha)} \quad (2.16)$$

Les contraintes sur l'interrupteur commandé et la diode sont les mêmes. En tension, on a :

$$V_{s.max} = |V_{d.max}| = \frac{V_e}{1 - \alpha} + \frac{\Delta V_s}{2} \quad (2.17)$$

et en courant :

$$I_{s.max} = |I_{d.max}| = \frac{I_e}{1 - \alpha} + \frac{\Delta I_s}{2} \quad (2.18)$$

Les caractéristiques de tension et du courant du convertisseur Boost sont décrites par la figure 2.9, comme suit :

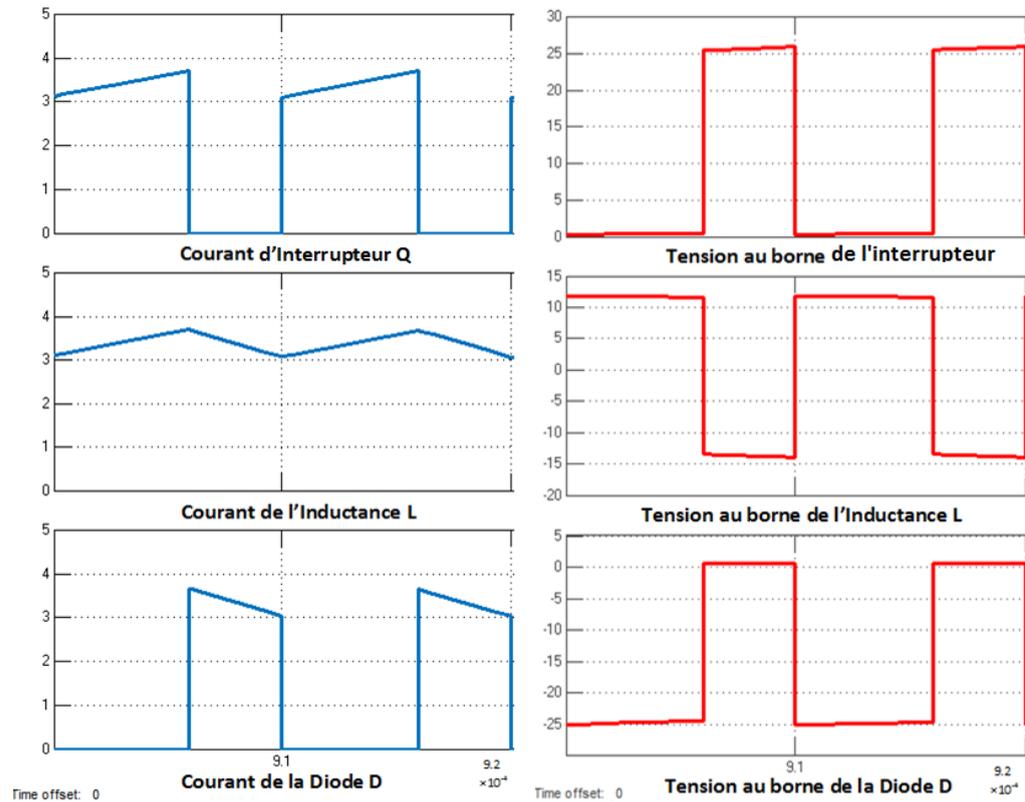


FIGURE 2.9 – Formes d'onde des courants et des tensions d'un convertisseur « Boost »

2.3.4.2 Convertisseur Buck

• Définition

Un convertisseur Buck, ou hacheur série, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur [19].

• Schéma du convertisseur Buck

Le hacheur dévolteur, sous sa forme de base est présenté par la (figure 2.10) Les composantes clés sont l'inductance (L), le commutateur (Transistor) (Q), la diode (D) et le condensateur (C). Celui-ci se charge par le commutateur (Q) et qui maintient la tension à ces bornes jusqu'à l'ouverture de qui fait décharger son énergie à travers la diode sur la charge pour un cycle de période de fonctionnement [2].

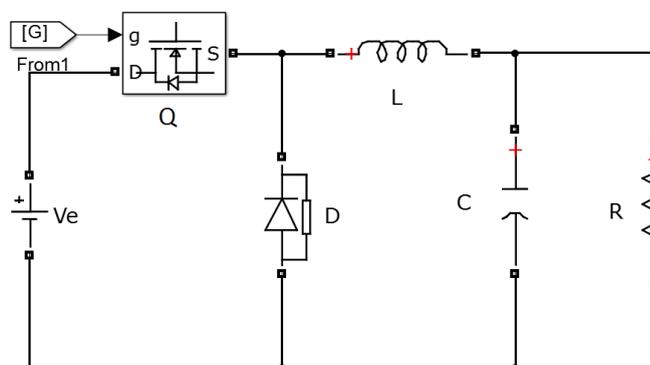


FIGURE 2.10 – Schéma électronique de convertisseur abaisseur « Buck »

Le commutateur peut être un transistor MOSFET ou un IGBT qui peut se commuter sur deux positions, marche ou arrêt rapidement. La tension de la source, par définition, doit être alors plus grande que la tension aux bornes de la charge.

• Principe de fonctionnement

Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source charge, lorsque le point de fonctionnement en couplage direct est à gauche du MPP. Alors, pour les deux modes de fonctionnement on a :

- **Pour T_{ON} (Q fermé) :** Si le commutateur Q est activé à t_0 , un courant circule dans le circuit, mais ne passe pas par la diode D puisqu'elle est inversement polarisée. Le courant i_L n'augmente pas immédiatement, mais plutôt linéairement avec un taux d'accroissement imposé par l'inductance L .(figure 2.11)

L'équation de la Tension : Pour Q fermé on a les équations des tensions $V_T = 0$ et $V_D = -V_e$, Alors la tension au borne de l'inductance sera

$$V_L = V_e - V_s = L \frac{di}{dt} > 0 \quad (2.19)$$

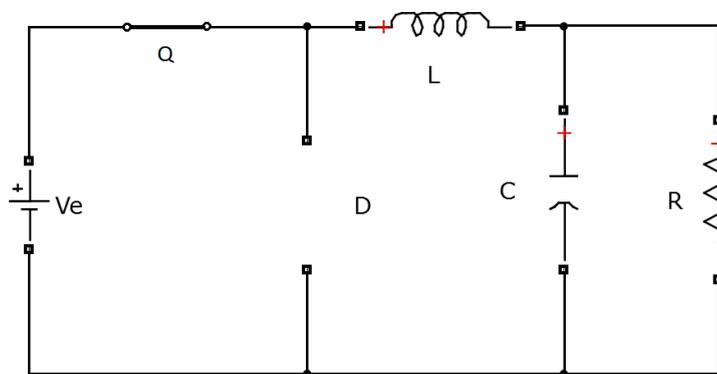


FIGURE 2.11 – Convertisseur Buck Durant l'état ON

L'équation des courants : A partir de l'intégration de l'équation (II.19) on peut faire sortir l'équation du courant i_L qui sera :

$$I_L = \frac{V_e - V_s}{L}t + I_{min} \quad (2.20)$$

L'inductance alors emmagasine de l'énergie sous forme magnétique.

- **Pour T_{OFF} (Q ouvert) :** Si Q est désactivé après $t = t_1$, la charge est déconnectée de son alimentation. Le courant est toutefois maintenu par l'énergie stockée dans l'inductance L et circule à travers la diode D appelée diode de roue libre. Cette dernière permet d'évacuer l'énergie emmagasinée dans l'inductance à l'ouverture du commutateur sans créer de surtension. (figure 2.12)

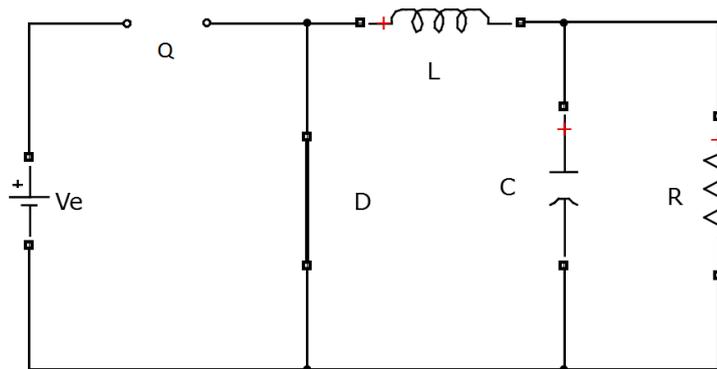


FIGURE 2.12 – Convertisseur Buck durant l'état OFF

L'équation de la Tension : Pour Q ouvert, les équations des tensions sont $V_D = 0$ et $V_T = V_e$, Alors la tension V_L sera :

$$V_L = -V_s = L \frac{di}{dt} < 0 \quad (2.21)$$

L'équation du courant :

$$I_L = \frac{-V_s}{L}t + I_{max} \quad (2.22)$$

Remarque

les composants du convertisseur sont dimensionnés pour que les tensions et courants à la sortie présentent de faibles ondulations lors du passage de l'interrupteur de la fermeture à l'ouverture et inversement[19].

Quoi qu'il en soit, la valeur moyenne V_s est inférieure à V_e . Dans le cas où la fréquence est augmentée, par exemple jusqu'au kHz, l'inductance nécessaire peut être réduite considérablement. La tension aux bornes de la charge est donnée par :

$$V_s = \frac{T_{ON}}{T} V_e = \alpha V_e \quad (2.23)$$

Grâce à cette équation, on peut voir que la tension de sortie varie linéairement avec le rapport cyclique α . On considère ici uniquement le comportement du circuit en mode de conduction continue (*MCC*). Il est à noter que l'interrupteur utilisé est un dispositif à semi-conducteur en commutation. Généralement, un transistor MOSFET est utilisé pour son faible temps de commutation afin de minimiser les pertes de puissance.

Les caractéristiques des tensions et des courants du convertisseur Buck dans le cas de la conduction continue sont décrites par la figure 2.13 , comme suit :

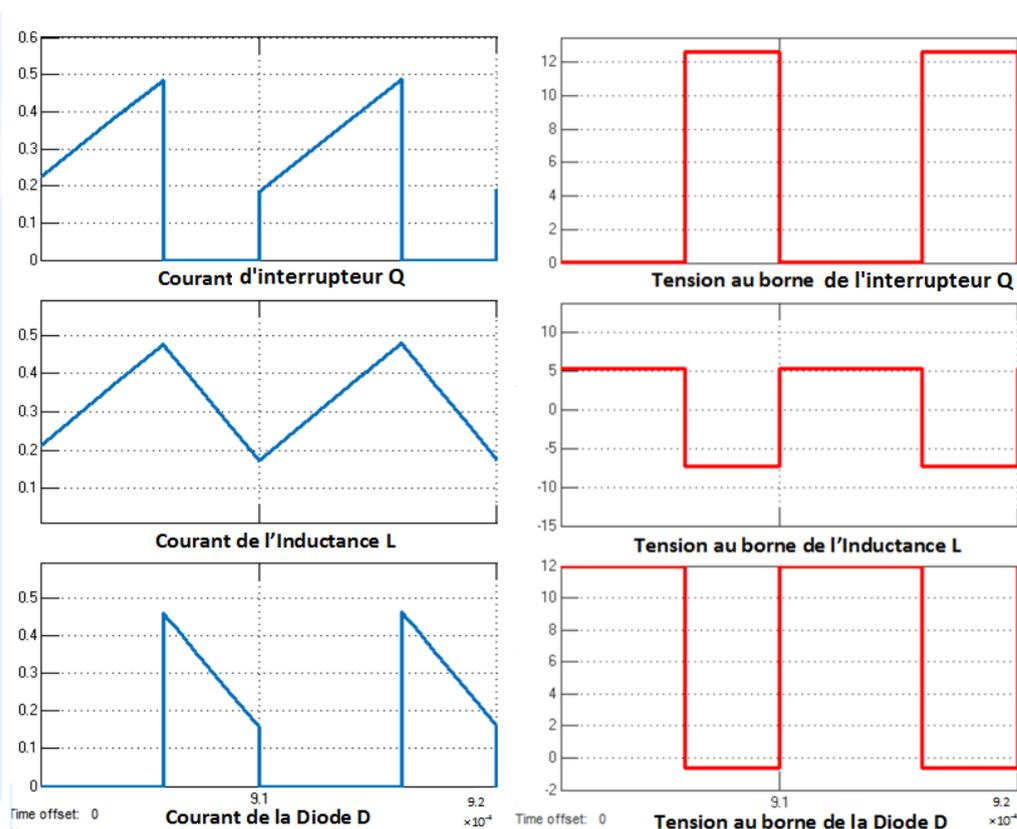


FIGURE 2.13 – Formes d'onde des courants et des tensions d'un convertisseur « Buck »

2.3.4.3 Convertisseur Buck-Boost

- **Définition**

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 [2].

- **Schéma du convertisseur Buck-Boost**

Dans ce dispositif (figure 2.14), la tension peut être augmentée ou diminuée selon le mode de commutation.

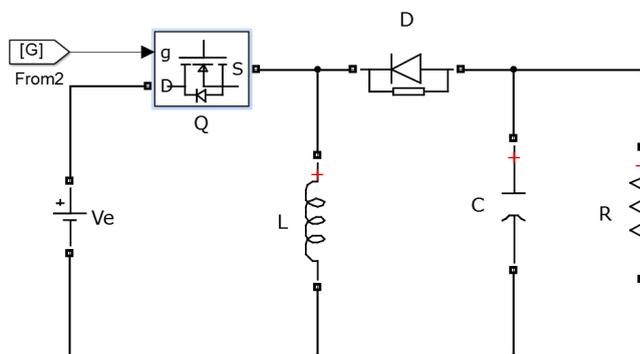


FIGURE 2.14 – Schéma de convertisseur inverseur « Buck-Boost »

- **Principe de fonctionnement**

Durant l'état «ON», l'énergie apportée par la source (générateur PV) est stockée dans l'inductance. L'énergie stockée dans l'inductance L est livrée ensuite à la charge pendant l'état «OFF».

- **Pour T_{ON} (Q fermé) :**

l'interrupteur Q est conducteur pendant le temps αT , l'énergie est stockée dans L et la tension de sortie est négative par rapport au point commun : la diode D est alors bloquée. (figure 2.15)

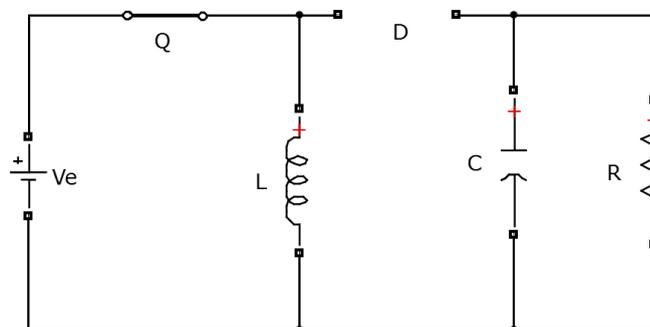


FIGURE 2.15 – Convertisseur Buck-Boost durant L'état ON

L'équation de la Tension : Pour Q fermé on a les équations des tensions $V_T = 0$ et $V_D = -V_e - V_e$, Alors la tension au borne de l'inductance sera

$$V_L = V_e = L \frac{di}{dt} > 0 \quad (2.24)$$

L'équation du courant : l'équation du courant i_L sera :

$$I_L = \frac{V_e}{L}t + I_{min} \quad (2.25)$$

- **Pour T_{OFF} (Q ouvert) :**

le blocage de l'interrupteur Q provoque la décharge de l'inductance dans la charge R et le condensateur C . Cette décharge peut être totale ou partielle (figure 2.16).

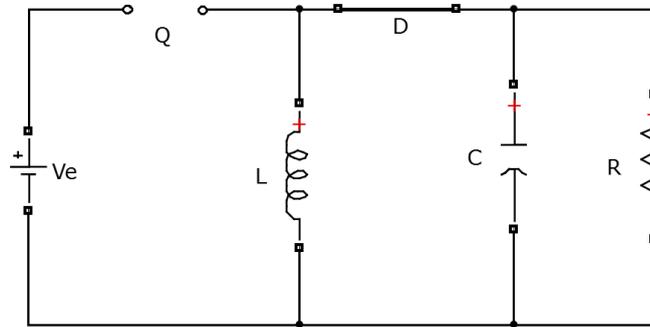


FIGURE 2.16 – Convertisseur Buck-Boost durant l'état OFF

L'équation de la Tension : Pour Q ouvert, les équations des tensions sont $V_D = 0$ et $V_T = V_e + V_s$, Alors la tension V_L sera :

$$V_L = -V_s = L \frac{di}{dt} < 0 \quad (2.26)$$

L'équation du courant :

$$I_L = \frac{-V_s}{L}t + I_{max} \quad (2.27)$$

En raison de la présence de la diode D , le courant circule à travers l'inductance L seulement dans une direction durant les deux états. Par conséquent, V_s a une polarité opposée à V_e . Pour cette raison, ce circuit est aussi appelé convertisseur inverseur. Les équations décrivant ce circuit peuvent être obtenues de la même manière qu'au paravent.

En conclusion, l'amplitude de V_s peut être inférieure ou supérieure à V_e suivant la valeur de T_{ON} et T_{OFF} :

$$V_s = \frac{T_{ON}}{T_{OFF}} V_e \quad (2.28)$$

$$V_s = \frac{\alpha}{(1 - \alpha)} V_e \quad (2.29)$$

Les caractéristiques des tensions et des courants du convertisseur Buck-Boost dans le cas de la conduction continue sont décrites par la figure 2.17 , comme suit :

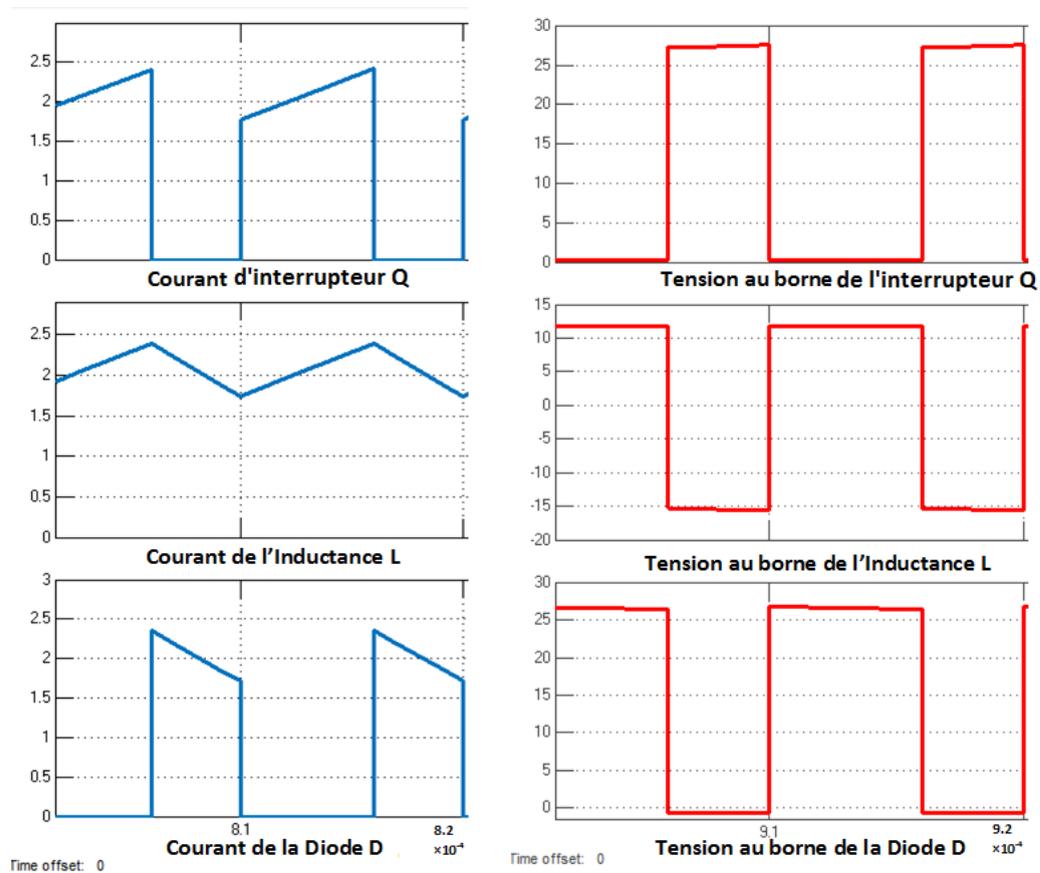


FIGURE 2.17 – Formes d'onde des courants et des tensions d'un convertisseur « Buck-Boost »

2.3.4.4 Convertisseur Cuk

- **Définition**

Un convertisseur Cuk 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. Au contraire des autres types de convertisseurs, qui utilisent une inductance, un convertisseur Cuk utilise un condensateur pour stocker de l'énergie [7].

- **Schéma de convertisseur**

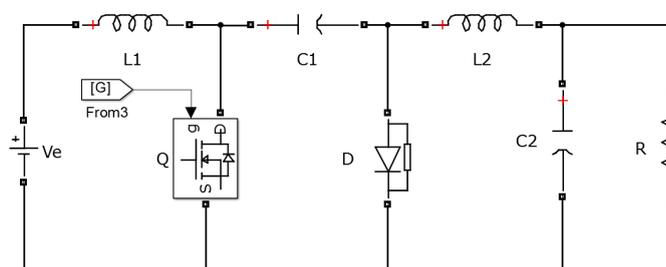


FIGURE 2.18 – Schéma de convertisseur inverseur « Cuk »

Le Cuk est constitué de deux inductances, de deux condensateurs, d'un interrupteur (généralement un transistor) et d'une diode. Le schéma de base d'un convertisseur Cuk est représenté par la figure 2.18 .

• **Principe de fonctionnement**

Un inconvénient subsiste concernant l'inversion du signe de la tension de sortie par rapport à celle de l'entrée. Par sa structure, le convertisseur Cuk peut travailler avec des tensions de sortie plus petites ou plus grandes que la tension d'entrée. En régime permanent, les tensions moyennes des inductances sont nulles, ainsi en appliquant la loi des mailles autour de la boucle extérieure du circuit représenté sur la figure 2.18 on trouve [7] :

$$V_{C1} = V_e - V_s \quad (2.30)$$

A l'état initial l'interrupteur Q est bloqué, la diode D est passante, et le condensateur C_1 est chargé. Les deux modes de fonctionnement sont alors :

Mode 1 : Quand l'interrupteur est fermé, le circuit est représenté sur la figure 2.19 . La tension du condensateur C_1 bloque la diode D par polarisation en inverse.

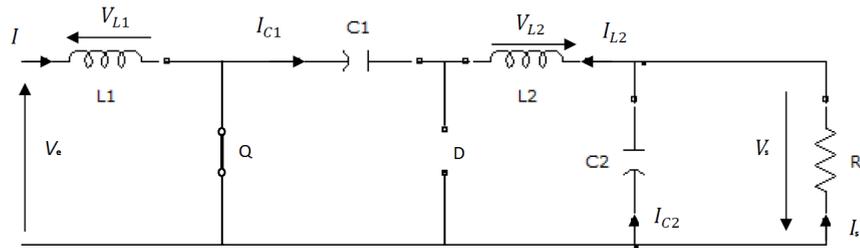


FIGURE 2.19 – Circuit équivalent du convertisseur Cuk avec Q fermé

Le condensateur C_1 décharge son énergie dans la charge à travers la boucle formée par l'interrupteur Q , C_2 , R , et L_2 . Les inductances sont supposées assez grandes, ainsi que les ondulations de leurs courants sont négligeables. Ce qui donne :

$$I_{C1} = -I_{L2} \quad (2.31)$$

$$I_{C2} = I_{L2} - \frac{V_{C2}}{R} \quad (2.32)$$

$$V_{L1} = V_e \quad (2.33)$$

$$V_{L2} = V_{C1} - V_{C2} \quad (2.34)$$

Mode 2 : Quand l'interrupteur est ouvert, le circuit est représenté sur la figure 2.20

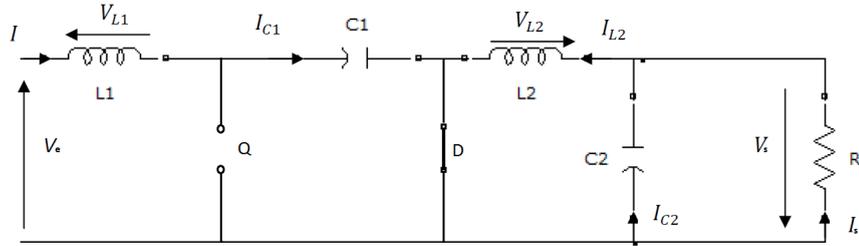


FIGURE 2.20 – Circuit équivalent du convertisseur Cuk avec Q ouvert

Le condensateur $C1$ se charge par la tension d'entrée V_e à travers l'inductance $L1$. L'énergie stockée dans l'inductance $L2$ est transférée à la charge par la boucle constituée par D , $C2$, $L2$ et R . On peut écrire donc :

$$I_{C1} = I_{L1} \quad (2.35)$$

$$I_{C2} = I_{L2} - \frac{V_{C2}}{R} \quad (2.36)$$

$$V_{L1} = -V_{C2} \quad (2.37)$$

$$V_{L2} = V_{C1} - V_{C2} \quad (2.38)$$

Comme le phénomène est périodique, le courant moyen du condensateur $C1$ est nul, ainsi, des équations (II.31) et (II.35), il vient :

$$[I_{C1}|_{Q_{ON}}]\alpha T + [I_{C1}|_{Q_{OFF}}](1 - \alpha)T = 0 \quad (2.39)$$

L'équation (II.39) se simplifie à :

$$- I_{L2}\alpha T + I_{L1}(1 - \alpha)T = 0 \quad (2.40)$$

ce qui conduit à

$$\frac{I_{L1}}{I_{L2}} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (2.41)$$

En supposant que le convertisseur est idéal, la puissance moyenne fournie par la source doit être égale à la puissance moyenne absorbée par la charge

$$P = P_0 \quad (2.42)$$

ce qui donne

$$I_{L1} = V_s I_{L2} \quad (2.43)$$

il vient donc

$$\frac{I_{L1}}{I_{L2}} = \frac{V_s}{V_e} \quad (2.44)$$

A partir des équations 2.41 et 2.42, la tension de sortie du convertisseur Cuk est :

$$V_s = -\frac{\alpha}{1-\alpha}V_e \quad (2.45)$$

Les caractéristiques des tensions et des courants du convertisseur Cuk sont décrites par la figure 2.21 , comme suit :

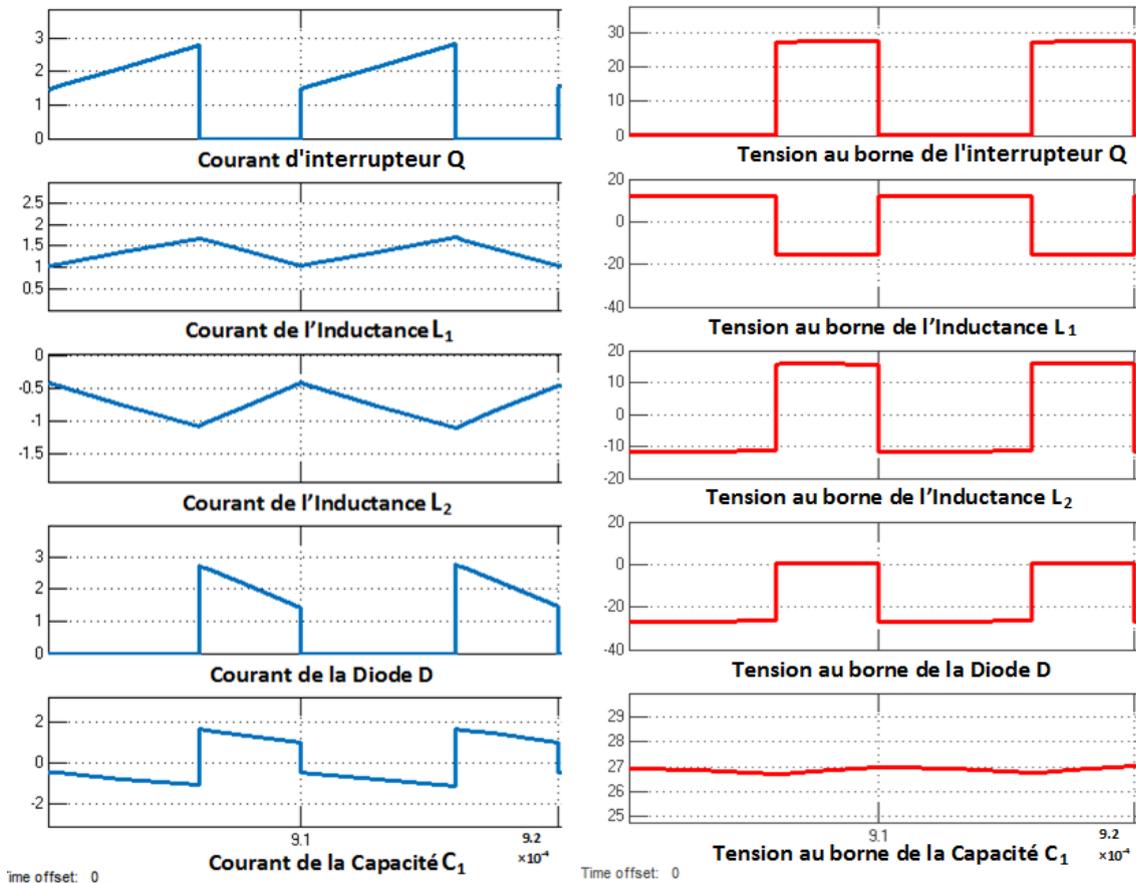


FIGURE 2.21 – Formes d’onde des tensions et des courants d’un convertisseur « Cuk »

2.3.4.5 Convertisseur Sepic

• Introduction

Dans ce projet, nous utilisons un générateur photovoltaïque constitué d’un module *PV* pour une certaine application photovoltaïque. Vu les changements d’ensoleillement et pour avoir un meilleur rendement de notre panneau solaire, nous avons choisi d’utiliser un convertisseur Sepic.

• Définition

Un convertisseur Sepic (Single Ended Primary Inductor Converter) est une alimentation à découpage convertissant une tension continue en une autre tension continue, de valeur différente (plus faible ou plus grande) [17].

• Historique

Le convertisseur Sepic est plus récent que les autres cités dans les sections précédentes. Il est dérivé du convertisseur Cuk. Ce circuit a été développé au laboratoire de BELL AT&T en 1970. Originellement, ce convertisseur a été conçu pour produire une tension de sortie soit supérieure ou inférieure à la tension d'entrée. La tension de sortie du convertisseur Sepic contient plus d'ondulations comparativement au convertisseur Cuk mais moins que les convertisseurs sur-volteur et dévolteur [11].

• Avantages du convertisseur Sepic dans les applications solaires

Les avantages du convertisseur Sepic dans les applications solaires sont nombreux parmi les quelles on cite :

- Il peut fonctionner comme élévateur ou abaisseur de tension.
- Il contient peu de composants.
- La commande du transistor se réfère à la masse.
- L'ondulation du courant d'entrée est limitée.
- Il n'y a pas de liaison entre l'entrée et la sortie en continu, grâce à la transmission d'énergie en série à travers un condensateur.

un court-circuit de la charge n'est donc pas répercuté sur l'entrée.[17]

• Schéma du convertisseur Sepic

Ce convertisseur peut avoir une multitude d'extensions de sorties directionnelles, de façon plus simple que dans le cas du convertisseur Cuk, en ajoutant un transformateur à deux enroulements secondaires, une diode, et un condensateur pour chaque sortie additionnelle.(figure 2.22).

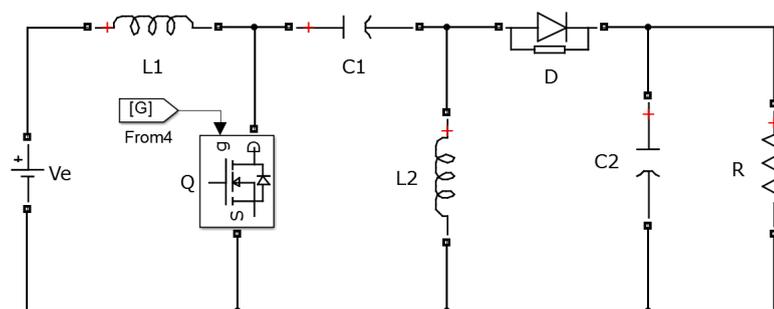


FIGURE 2.22 – Schéma de convertisseur inverseur « Sepic »

• Principe de fonctionnement

Pendant la phase de conduction, Q est en état passant (T_{ON}), la tension aux bornes de l'inductance L_1 est égale à V_e , le condensateur C_1 est connecté en parallèle avec L_2 et la tension aux bornes de L_2 est la même que la tension du condensateur égale à $(-V_e)$ (figure 2.23). La diode D est en polarisation inverse donc bloquée. Le courant de la charge est fourni par le condensateur C_2 . Pendant cette période le courant est stocké en L_1 par l'entrée et en L_2 par C_1 .

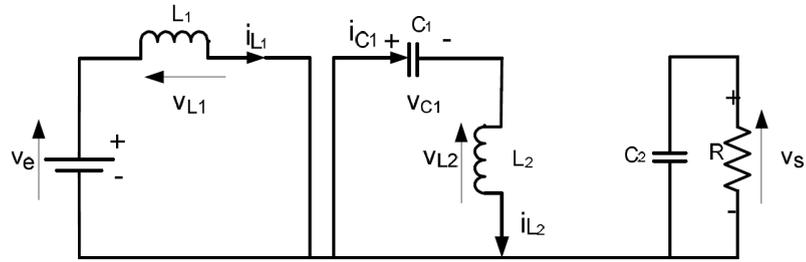


FIGURE 2.23 – Convertisseur Sepic Durant l'état ON

L'opération dans le mode de conduction discontinue (figure 2.24) ajoute une séquence additionnelle. Ce régime est atteint lorsque le courant dans la diode s'annule avant la fin de la période de commutation. Ceci se produit lorsque la valeur moyenne du courant, $I_L = I_{L1} + I_{L2}$, devient inférieure à la demi-ondulation crête à crête de ce même courant.

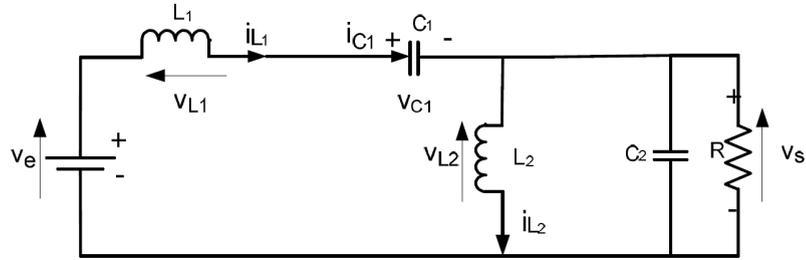


FIGURE 2.24 – Convertisseur Sepic Durant l'état OFF

On déduit que la fonction de transfert de sortie est :

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{\alpha^2 \cdot V_e}{2 \cdot L_{eq} \cdot f \cdot I_s} \quad (2.46)$$

Avec

$$L_{eq} = \frac{L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2} \quad (2.47)$$

La tension de sortie est alors :

$$V_s = \frac{\alpha}{(1 - \alpha)} V_e \quad (2.48)$$

Et la relation entre les courants moyens est :

$$I_{L1} = \frac{\alpha}{(1 - \alpha)} I_{L2} = \frac{\alpha}{(1 - \alpha)} I_s \quad (2.49)$$

Alors le Sepic est le convertisseur idéal pour la recharge des batteries possédant une tension de sortie positive contrairement au Buck-Boost. Ce chapitre a présenté une analyse rapide du fonctionnement du convertisseur Sepic ainsi que des directives d'optimisation de sa conception qui vont nous aider pour le montage de notre convertisseur [17].

Les caractéristiques des tensions et des courants du convertisseur Sepic dans le cas de la conduction continue sont décrites par les figures 2.25, comme suit :

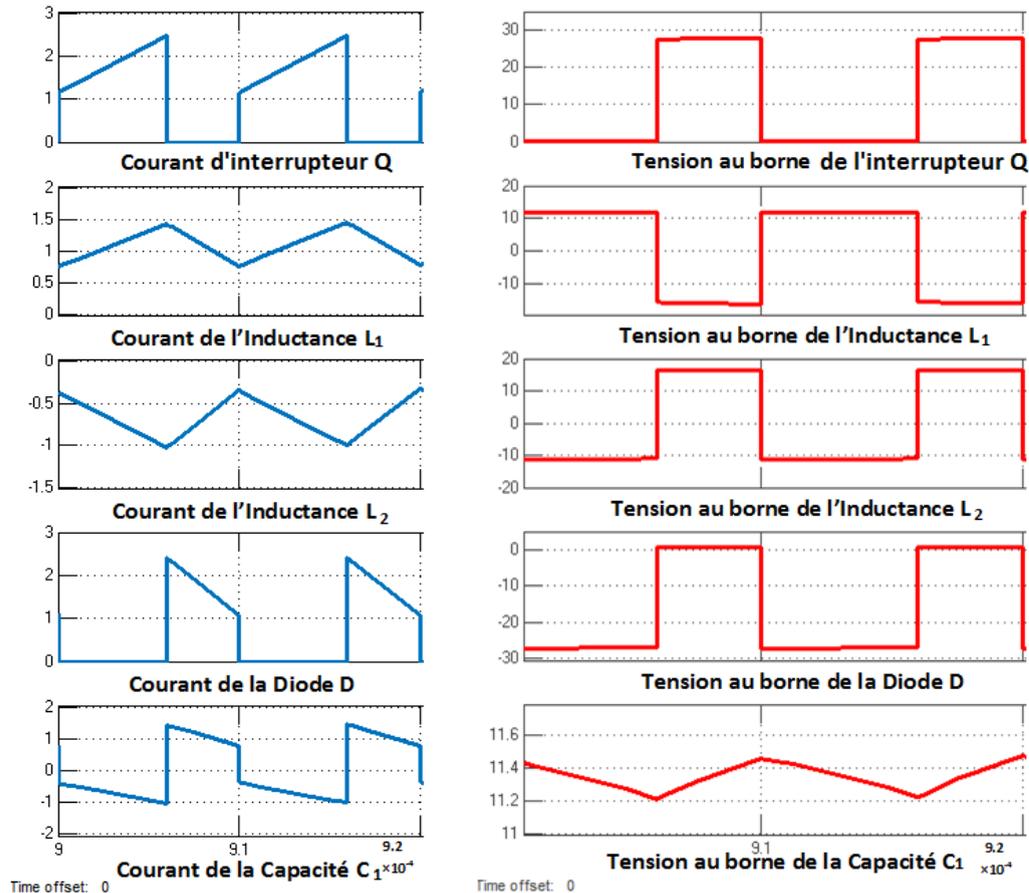


FIGURE 2.25 – Formes d'onde des tensions et des courants d'un convertisseur « Sepic »

2.4 Convertisseurs DC-AC

2.4.1 Introduction

Un onduleur est un dispositif électronique assurant la conversion statique d'une tension/courant continu en tension /courant alternatif. Il est dit autonome s'il assure de lui même sa fréquence et sa forme d'onde. La fonction principale de cet appareil est de créer au niveau de sa sortie une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace à partir d'une tension continue en entrée [16].

2.4.2 Principe de fonctionnement d'un onduleur

On note deux types des onduleurs :

- Onduleur Monophasé.
- Onduleur Triphasé.

2.4.2.1 Onduleur Monophasé

Ce type d'onduleur délivrant en sa sortie une tension alternative monophasée, est généralement destinée aux alimentations de secours. suivant leur topologie, on distingue deux classes d'onduleurs monophasés :

- Onduleur monophasé en demi-point,
- Onduleur monophasé en pont (Pont H) [16].

Dans ce chapitre on s'intéresse qu'au deuxième type, L'onduleur monophasé en pont.

2.4.2.2 Onduleur monophasé en pont (Pont H)

L'onduleur en pont représenté en figure 2.26 comporte quatre interrupteurs de puissance commandées notées K1, K2, K3 et K4 respectivement.

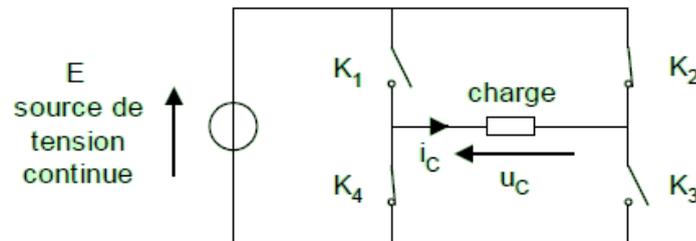


FIGURE 2.26 – Schéma de Principe d'un Onduleur Monophasé En Pont H

En pratique le montage de ce type d'onduleur est comme suite :

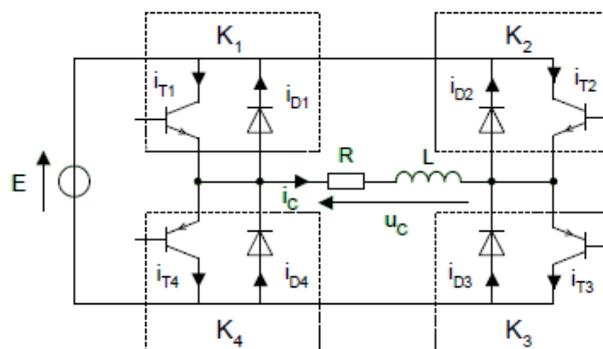


FIGURE 2.27 – Schéma réel d'un onduleur en pont H

Il existe plusieurs types de commandes d'onduleurs (symétrique , Décalée, MLI). Ces commandes ont le but d'obtenir l'allure sinusoïdale ou niveau de la sortie .et pour chaque commande le principe de fonctionnement se change [10] .

Commande symétrique

Cette commande se trouve aussi sous le nom de Commande simultanée ou à deux niveaux tensions.

On note T la période de fonctionnement des interrupteurs. Le principe de fonctionnement de cet onduleur est le suivant :

Quand les interrupteurs K_1 et K_3 , sont fermés simultanément durant l'intervalle $[0, T/2]$, la tension imposée aux bornes de la charge prend la valeur $+E$, et de $-E$ lors de la fermeture simultanée des deux autres interrupteurs K_2 et K_4 pendant $[T/2, T]$. l'allure de tension aux borne de la charge montré dans la figure 2.28.

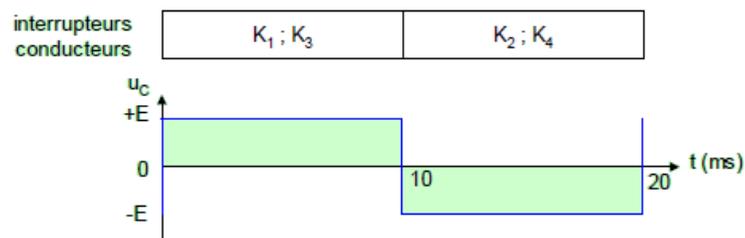


FIGURE 2.28 – Tension aux bornes de la charge

Comme l'onduleur en demi-pont, le courant traversant la charge suivre la trajectoire de tension si la charge est inductive. Par contre si elle est inductive le courant évolue suivant 4 phases :

-1^{er}phase

$$U_c = +E$$

$$K_1 ; K_3 \text{ conduisent} \Rightarrow i_c < 0$$

$$D_1 ; D_3 \text{ conduisent} \Rightarrow i_{D_1}(t) = i_{D_3}(t) = -i_c(t)$$

-2^ephase

$$U_c = +E$$

$$K_1 ; K_3 \text{ conduisent} \Rightarrow i_c > 0$$

$$T_1 ; T_3 \text{ conduisent} \Rightarrow i_{T_1}(t) = i_{T_3}(t) = i_c(t)$$

-3^ephase

$$U_c = -E$$

$$K_2 ; K_4 \text{ conduisent} \Rightarrow i_c > 0$$

$$D_2 ; D_4 \text{ conduisent} \Rightarrow i_{D_2}(t) = i_{D_4}(t) = i_c(t)$$

-4^ephase

$$U_c = -E$$

$$K_2 ; K_4 \text{ conduisent} \Rightarrow i_c < 0$$

$$T_2 ; T_4 \text{ conduisent} \Rightarrow i_{T_2}(t) = i_{T_4}(t) = -i_c(t)$$

D'où les chronogrammes sur la figure 2.29.

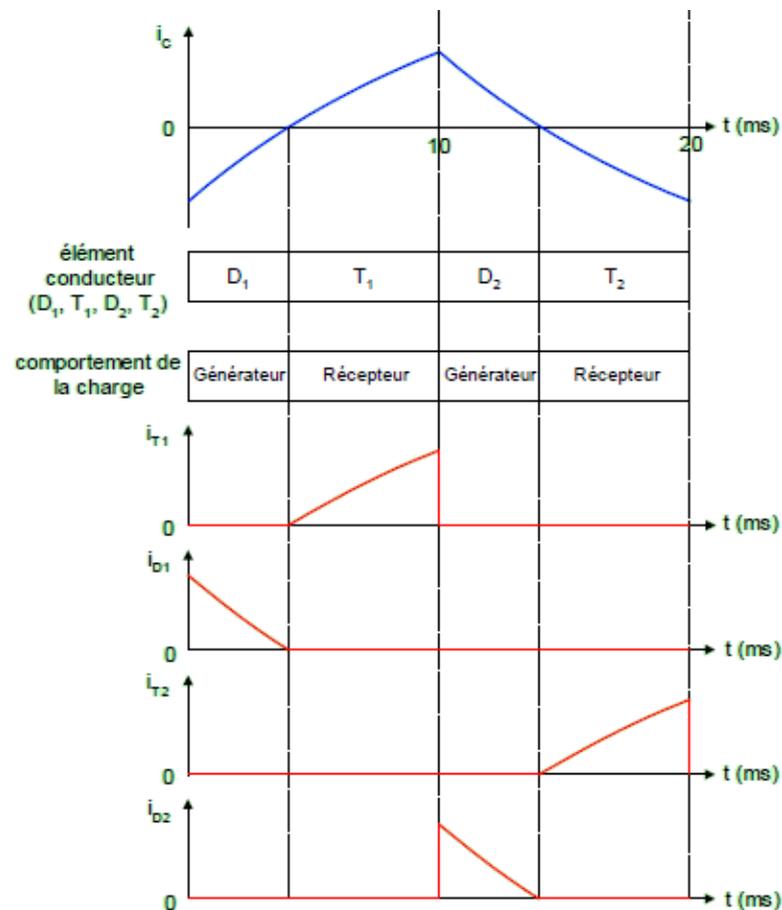


FIGURE 2.29 – Formes d'onde pour la commande symétrique

-Commande décalée

Dite aussi commande à trois niveaux tensions.

Il est possible d'obtenir trois niveaux de tensions si les deux cellules de commutation de cet onduleur fonctionnent de manière totalement indépendante l'une de l'autre. Pour cela un décalage temporel β des ordres de commande de ces deux cellules, permet de générer les trois niveaux de tension : $+E$, 0 et $-E$.

$0 < \omega t < \beta$:

Les interrupteurs K3 et K4 sont fermés, K1 et K2 sont ouverts :

$U_c = 0$ V

$i_c < 0 \Rightarrow D3; T4$ conduisent

$-\beta < \omega t < \pi$:

Les interrupteurs K1 et K3 sont fermés, K2 et K4 sont ouverts :

$U_c = +E$;

Si $i_c < 0 \Rightarrow D1, D3$ conduisent

Si $i_c > 0 \Rightarrow T1, T3$ conduisent

$$-\pi < \omega t < \pi + \beta :$$

Les interrupteurs K1 et K2 sont fermés, K3 et K4 sont ouverts :

$$U_c = 0 ;$$

$i_c > 0 \Rightarrow D2 ; T1$ conduisent

$$-\pi + \beta < \omega t < 2\pi :$$

Les interrupteurs K2 et K4 sont fermés, K1 et K3 sont ouverts :

$$U_c = -E ;$$

Si $i_c > 0 \Rightarrow D4, D2$ conduisent

Si $i_c < 0 \Rightarrow T4, T2$ conduisent

On peut régler l'angle de commande β de manière à ce que cette courbe se rapproche le plus d'une sinusoïde [13].

D'où la figure 2.30 :

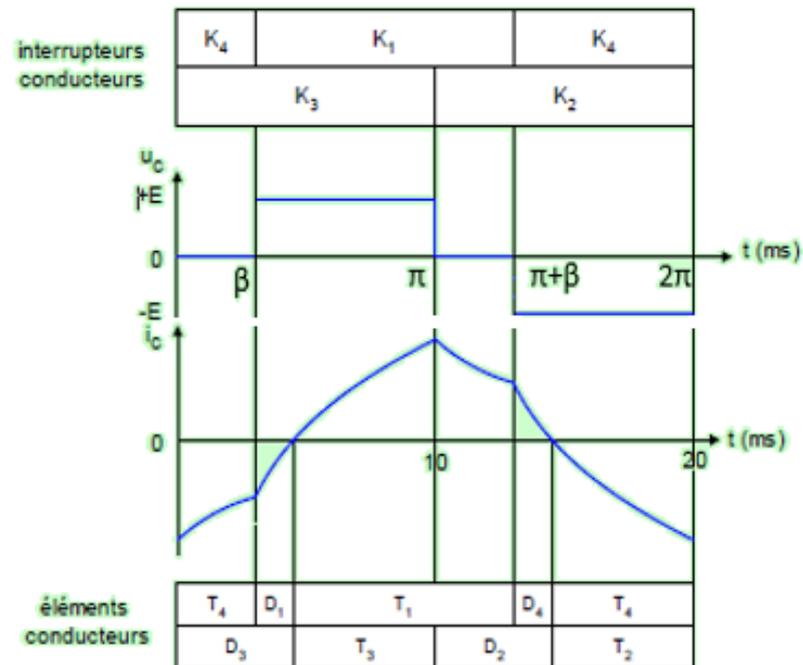


FIGURE 2.30 – Courant et la tension aux bornes de la charge

La valeur efficace de tension de sortie U_c ne dépend que de l'angle β . Sa valeur efficace est [13] :

$$V_{eff} = E \sqrt{1 - \frac{\beta}{\pi}} \quad (2.50)$$

2.4.2.3 Onduleur triphasé

Ce type d'onduleur est généralement recommandé pour des applications de grande puissance. La structure de tel convertisseur se fait par l'association, en parallèle, de trois onduleurs monophasés en demi pont (ou en pont) donnant trois tensions de sortie déphasées de 120° degrés, l'une par rapport à l'autre.

La figure 2.31 illustre la topologie d'un onduleur triphasé à six interrupteurs de puissance. Le décalage entre les signaux de commande est de 60° [16].

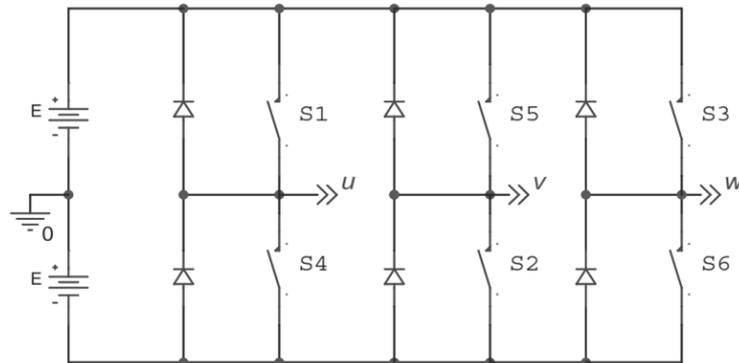


FIGURE 2.31 – Schéma de Principe d'un onduleur triphasé en pont

2.5 Puissances des convertisseurs

2.5.1 Définition

Considérons un convertisseur statique quelconque relié à un récepteur. Nous adopterons la convention "générateur" pour le convertisseur et donc la convention "récepteur" pour le récepteur. (figure 3.4)

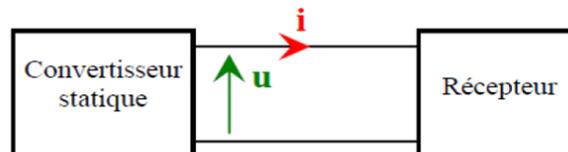


FIGURE 2.32 – Couplage de convertisseur avec un récepteur

2.5.2 Puissance instantanée

La puissance instantanée est, comme en régime continu, définie par le produit "courant \times tension". En principe, cette puissance est variable dans le temps.

$$P(t) = u(t) \times i(t) \quad (2.51)$$

2.5.3 Puissance active

La puissance active P (watt) est la valeur moyenne de la puissance instantanée $P(t)$:

$$P(t) = P_{moyenne} = \langle u(t) \times i(t) \rangle \quad (2.52)$$

Ce n'est qu'en régime sinusoïdal alternatif que l'on :

$$P(t) = U.I.\cos\varphi \quad (2.53)$$

2.5.4 Puissance apparente

La puissance apparente S est définie par le produit " $U_{eff} \times I_{eff}$ ". C'est une grandeur théorique qui sert à dimensionner les générateurs :

$$S = U.I \quad (2.54)$$

• Facteur de puissance

Pour évaluer ce phénomène, on définit le facteur de puissance k ($k < 1$) :

$$K = \frac{\langle u(t) \times i(t) \rangle}{U_{eff} \cdot I_{eff}} \quad (2.55)$$

$$\text{Soit } K = \frac{P}{S}$$

$$K = \cos\varphi \quad (2.56)$$

2.6 Stockage par batteries

2.6.1 Introduction

Les générateurs photovoltaïques génèrent le jour une puissance considérée comme intermittente, car elles ne fonctionnent pas la nuit, ou lorsque les conditions climatiques sont inappropriées. Pour résoudre ce problème, notre montage nécessite d'intégrer un système de stockage qui va emmagasiner l'énergie délivrée par les panneaux, quand ces derniers génèrent plus d'énergie que le réseau ou la charge en a besoin. Cette énergie ainsi stockée pourra être envoyée au réseau au moment ou alimenter une charge à un moment adéquat.

La batterie est un périphérique de stockage qui répond à nos attentes, elle est utilisée dans de nombreux domaines et elle est en plein essor. Grâce à cela, de nombreux efforts sont fournis pour améliorer son fonctionnement.

2.6.2 Principe de fonctionnement

un générateur électrochimique est essentiellement basé sur la conversion de l'énergie chimique en énergie électrique. Toute réaction d'oxydoréduction, pourvu qu'elle soit spontanée, c'est-à-dire accompagnée d'une diminution d'énergie libre, est en effet susceptible de donner naissance à un courant électrique lorsqu'elle a lieu dans des conditions appropriées. Pour cela, il faut que l'échange des électrons de valence s'effectue par le canal d'un circuit extérieur au système. Ainsi la combustion libre de l'hydrogène produisant de l'eau et de l'énergie calorifique ne peut donner naissance à un courant car l'échange électronique s'accomplit directement, en quelque sorte par un court-circuitage moléculaire [14] .

En charge, l'énergie électrique est convertie et stockée sous forme d'énergie chimique à travers des réactions d'oxydoréduction. En décharge, l'élément fonctionne en mode générateur. Dans ce cas, l'énergie chimique est convertie en énergie électrique, et les réactions inverses se produisent aux électrodes.

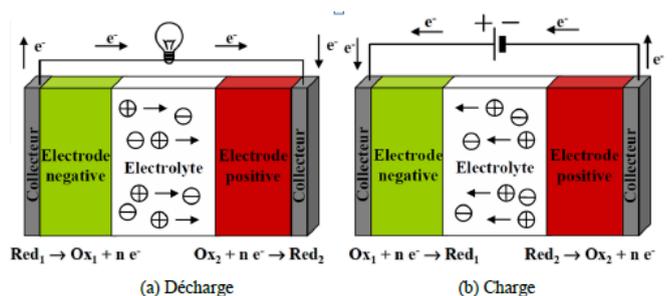


FIGURE 2.33 – Principe de fonctionnement d'un accumulateur en charge et décharge

Un accumulateur est constitué principalement, de deux électrodes qui permettent de stocker les électrons à l'issue des réactions électrochimiques d'oxydoréduction. Ces électrodes sont immergées dans l'électrolyte qui permet le transport des espèces ioniques d'une électrode à l'autre. Le séparateur permet l'isolation électrique pour assurer le passage des électrons via le circuit électrique extérieur. Enfin, pour assurer le contact avec ce circuit extérieur, des collecteurs de courant, bons conducteurs électroniques, sont présents à chaque électrode. La figure 1.1 présente le schéma de principe de fonctionnement d'un accumulateur pour les modes de décharge (a) et de charge (b). Généralement, on entend par accumulateur la cellule électrochimique composée de deux électrodes et de l'électrolyte. La dénomination batterie désigne plutôt l'ensemble de cellules connectées en série ou/et en parallèle, d'où le nom de batterie d'accumulateur. Néanmoins, le terme de batterie est souvent appliqué à la cellule seule ou élément. Pour distinguer les électrodes, en considérant la décharge, l'électrode négative est appelée anode car elle est le siège de réactions d'oxydation et l'électrode positive, siège de réactions de réduction, est appelée cathode. En revanche, en charge, les réactions aux électrodes sont inversées : oxydation à la positive et réduction à la négative.

2.6.3 Caractéristique de la batterie

2.6.3.1 Résistance interne de l'accumulateur

La résistance est déterminée en fonction de ses composants, à savoir : la résistance de l'électrolyte, la résistance de contact entre les électrodes et les cellules, et la résistance des matériaux propre à chacune des électrodes.

2.6.3.2 Tension à vide

La tension à vide est la tension dans laquelle la batterie est totalement chargée.

2.6.3.3 Tension nominale

La tension nominale représente la tension que la batterie doit recevoir en sorte qu'elle fonctionne correctement. Cette tension diffère en fonction des différents types de batteries, Cette tension peut avoir une valeur de 6V, 12V, 24V, 48V'

2.6.3.4 Rendement

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

2.6.3.5 Tension de fin décharge

Comme son nom l'indique, cette tension correspond à la valeur de la tension une fois la batterie complètement déchargé. Donc c'est la marge de tension que doit avoir pour ne pas endommager la batterie.

2.6.3.6 Capacité

Ce paramètre correspond à l'énergie maximale que la batterie peut emmagasiner et donc fournir, elle est proportionnelle à la dimension de la batterie, elle se défini par l'équation :

$$Q = \int I_b(t)dt \quad (2.57)$$

Son unité de mesure est l'ampère-heure (Ah).[8]

2.6.3.7 Taux de décharge et recharge

Le taux de décharge correspond au temps que la batterie met pour se décharger dans son intégralité.

2.6.3.8 Profondeur de décharge

Cette caractéristique est exprimée en pourcentage et elle représente l'énergie maximale qui doit être extraite de la batterie qui est utilisé pendant un cycle de charge/décharge, elle influence sur la durée de vie de la batterie (plus la profondeur de décharge est important plus la durée de vie de la batterie sera courte).

2.6.3.9 Température

La température influe sur le rendement de la batterie. Afin d'avoir un rendement optimal, la température idéal est de 25 degré.

2.6.3.10 Durée de vie et nombre de jour d'autonomie

Le nombre de jour d'autonomie est la période pendant laquelle la batterie assure le fonctionnement du récepteur jusqu'à sa décharge, sans la recharger.

2.6.3.11 Énergie

Elle s'exprime généralement en joule, mais peut aussi s'exprimer en watt/heure. Elle est régit par l'équation :

$$E = \int V_1(t)i_b(t)dt \quad (2.58)$$

2.6.3.12 État de charge de l'accumulateur

L'état de charge, souvent simplifié par l'acronyme SOC (state-of-charge), est une caractéristique très importante à connaître, puisque'elle nous renseigne, en pourcentage, sur le niveau de charge de la batterie. Être capable d'estimer l'état de charge permet d'éviter les décharges profonde ou les charges excessives qui abîmeront les batteries. Cette observation à pour objectif d'anticiper la dégradation de la batterie afin d'allonger au maximum sa durée de vie. L'état de charge peut être défini par la capacité disponible exprimée en fonction de la capacité nominale, comme le montre l'équation :

$$CSOC = \frac{Capacitdisponible(AHr)}{Capacitnominale(AHr)} * 100 \quad (2.59)$$

Ils existent de nombreuses techniques d'estimation du SOC, aussi bien physiques qu'électrique. La méthode physique consiste donc à mesurer la densité de l'électrolyte à l'aide d'un tensiomètre. Plus la densité de l'électrolyte sera grande, plus l'état de charge sera élevé. Pour effectuer la mesure, il faut enlever l'électrolyte. Cette manipulation n'est pas possible sur toutes les batteries. Il y a également au préalable une longue période de stabilisation pour obtenir des résultats précis.[8] La méthode électrique la plus utilisée est celle de l'intégration du courant. Il existe un lien entre la quantité de courant de la batterie, la charge et la décharge de la batterie. Dans ce cas, l'état de charge peut être défini par l'équation :

$$CSOC(t) = SOC_0 - \frac{\int I_b(\tau)d\tau}{Q} \quad (2.60)$$

SOC_0 :Etat de charge initiale

$\int I_b(\tau)d\tau$: charge délivrée par la batterie a l'instant t

Q : Charge nominale de la batterie

Une autre méthode pour la détermination de SOC consiste à se baser sur la mesure du courant et de la tension, et ainsi estimer la tension à vide. Il existe une relation linéaire approximative entre la tension à vide et l'état de charge, caractérisée par l'équation :

$$SOC(t) = \frac{\int V_0(t) - a}{b} \quad (2.61)$$

Avec : a : étant la tension lorsque SOC (t) = 0 b : est obtenue à partir de la valeur a et 0V (t) lorsque SOC(t) = 100L'estimation de l'état de charge est essentielle à la gestion de l'énergie car elle permet d'optimiser la performance de l'accumulateur.

2.6.3.13 Circuit équivalent

Le modèle de circuit équivalent le plus utilisé est le suivant :

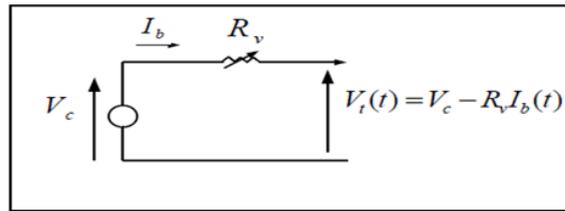


FIGURE 2.34 – Modèle simplifié de l'accumulateur

Avec R_v la résistance variable qui s'exprime :

$$R_v = R_i + K \frac{Q}{Q - \int I_b dt} \quad (2.62)$$

2.6.4 Types d'accumulateurs

2.6.4.1 Accumulateur au plomb P b

Le premier accumulateur secondaire inventé par Gustave Planté confère en 1859, cette technologie est moins coûteuse, elle est souvent utilisée pour les systèmes automobiles pour le démarrage des moteurs à combustion et pour les applications stationnaires notamment le stockage d'énergie photovoltaïque et il n'est pas sensible à l'effet mémoire. Néanmoins, cette technologie est assez polluante, le nombre de cycle est assez bas et son énergie est limitée, en témoigne ce tableau récapitulatif [8] [10] :

Durée de vie (année)	4-5
Nombre de cycle de vie	800
Rendement charge/décharge (%)	50
Autodécharge (%)	5
Tension nominale par élément (V)	2.1
Résistance interne(Ohm)	Très faible
Température en fonctionnement (°C)	Ambiante
Energie massique (Wh/kg)	30-50
Energie volumique (Wh/l)	75-120
Temps de charge (h)	8

TABLE 2.3 – Caractéristiques de l’accumulateur au plomb

2.6.4.2 Accumulateur Nickel-Cadmium Ni Cd

Cet accumulateur, plus récent que celui au plomb, inventé en 1899 par le suédois Waldemar Junger invente la première batterie rechargeable, il possède des avantages et des inconvénients :

- **Avantages**

- contenu...
- la capacité de réaliser un grand nombre de cycle de charge/décharge
- sa résistance interne très faible, ce qui minimise les pertes de puissances
- son stockage est simple, adapté à différents niveau de charge
- sa charge est très rapide (60% de la capacité de charge totale en 20 minutes).

- **Inconvénients**

- Leur coût du produit est 3 fois supérieur par rapport aux batteries de plomb.
- le caractère polluant du cadmium est un inconvénient de taille pour ce modèle.
- Il possède également une faible densité énergétique et se décharge assez rapidement.

- il est sensible à l’effet mémoire.

Les caractéristiques de cette batterie son résumé dans le tableau :

2.6.4.3 Accumulateur Nickel-Metal-Hydride Ni-MH

Cet accumulateur, contrairement aux deux précédent, n’est pas polluant (absence de cadmium et du plomb). Il peut emmagasiner plus d’énergie que le Ni-Cd et est peu sensible à l’effet mémoire. Il a dans sa globalité de meilleures performances que le Ni-Cd, même si son auto décharge est plus handicapante et sa durée de vie plus courte en nombre de cycle. Il détecte difficilement la fin de charge et ne supporte pas le dépassement de charge. Les caractéristiques de cette batterie son résumé dans le tableau :

Durée de vie (année)	2-3
Nombre de cycle de vie	1200
Rendement charge/décharge (%)	70-90
Autodécharge (%)	15
Tension nominale par élément (V)	1.2
Résistance interne(Ohm)	Environ 0.06 par cellule de 1 Ah
Température en fonctionnement (°C)	-40 à +80
Energie massique (Wh/kg)	45-80
Energie volumique (Wh/l)	80-150
Temps de charge (h)	1

TABLE 2.4 – Caractéristiques de l’accumulateur Ni-Cd

Durée de vie (année)	2-4
Nombre de cycle de vie	1000
Rendement charge/décharge (%)	66
Autodécharge (%)	20
Tension nominale par élément (V)	1.2
Résistance interne(Ohm)	Environ 0.06 par cellule de 1 Ah
Température en fonctionnement (°C)	Ambiante
Energie massique (Wh/kg)	60-110
Energie volumique (Wh/l)	220-330
Temps de charge (h)	1

TABLE 2.5 – Caractéristiques de l’accumulateur Ni-Mh

2.6.4.4 Accumulateur Li-ion

Il ne présente aucun effet mémoire et une faible auto-décharge. Bien qu’il ne nécessite pas de maintenance, sa durée de vie est faible. Paradoxalement, il possède un nombre correct de cycle de vie. Cela veut dire que ce modèle s’use même si il n’est pas utilisé (vieillessement, usure, corrosion). Des efforts pour pallier ce manque de durée de vie sont en train d’être réalisés, notamment en changeant la structure de l’électrode. L’amélioration des performances de ce modèle est en plein essor. Son avantage primordial est sa haute densité d’énergie (grand potentiel électrochimique). Le lithium étant un métal très léger, son poids est également un avantage. La principale faiblesse de ce modèle réside dans son aspect sécuritaire : la surchauffe peut entraîner l’explosion. Pour assurer la sécurité, la batterie doit être munie d’un système de protection. L’autre moyen développé est de modifier le couple, en utilisant un accumulateur Li-Polymère, mais malgré son avantage sécuritaire cet accumulateur n’est pas suffisamment compétitif (puissance massique et nombre de cycle charge/décharge trop faible). Les caractéristiques de la batterie Li-ion sont résumé dans le tableau :

Durée de vie (année)	7
Nombre de cycle de vie	1000
Rendement charge/décharge (%)	90
Autodécharge (%)	2
Tension nominale par élément (V)	3.6
Résistance interne(Ohm)	très faible
Température en fonctionnement (°C)	Ambiante
Energie massique (Wh/kg)	90-180
Energie volumique (Wh/l)	220-400
Temps de charge (h)	2-3

TABLE 2.6 – Caractéristiques de l'accumulateur Ni-Mh

2.6.4.5 Autres batteries

• Nickel-Zinc

Dans le contexte actuel de souci environnemental, le remplacement du Cadmium par le Zinc serait meilleur. La tension de ce couple varie de 1.6 à 1.8 V. Ce couple à l'avantage d'être moins coûteux que le Ni-Cd. En revanche, son plus gros défaut est une mauvaise résistance au cyclage (environ 600 à 1000 cycles) et sa durée de vie reste le problème majeur à résoudre. La réaction chimique réversible globale est donnée par :



• Nickel-Fer

Cette technologie peut atteint un grand nombre de cycles. Ils ont un fort taux d'auto-décharge et un rendement faible. La tension est entre 1,2 et 1,4 V.

• Nickel-halogène

Les avantages des électrodes en Nickel sont un coût relativement faible, sa légèreté et produit un potentiel élevé. Pour améliorer le cycle de vie de ce type d'accumulateur, des études ont conduit au remplacement de l'électrolyte alcalin par une solution acide. Les couples les plus prometteurs sont Zinc-Chlore Zn - Cl₂ et Zinc-Brome Zn - Br₂. Ce dernier donne une f.e.m de 1,9 V. Ce type de pile est adapté au régime de décharge soutenu sur un faible intervalle de temps.

2.7 Conculsion

Dans ce chapitre nous avons présenté les caractéristiques électriques des convertisseurs statiques DC-DC.nous avons montré par simulation que la valeur moyenne de la tension de sortie peut être ajustée en jouant sur la valeur du rapport cyclique. Nous avons basé sur l'étude des convertisseurs du courant continu (Sepic) pour le but d'utiliser la simulation dans la chapitre IV. Dans le chapitre prochain, on présentera une étude sur les commandes MPPT pour chercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale.

Chapitre 3

Etude et dimensionnement d'un système photovoltaïque sans stockage

SOMMAIRE

3.1	INTRODUCTION	55
3.2	ÉTUDE DES PARAMÈTRES ENVIRONNEMENTAL	55
3.2.1	Choix du site	55
3.2.2	Estimation de la consommation journalière	56
3.2.3	Estimation de l'ensoleillement	57
3.2.4	Calculer la puissance de l'installation	57
3.3	DIMENSIONNEMENT DES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES	58
3.3.1	Type des panneaux solaires utilisés	58
3.3.2	Caractéristiques des panneaux solaires utilisés	58
3.3.3	Calcul de nombre des panneaux nécessaire	59
3.3.4	Schéma du modèle SunPower305 sur Matlab	59
3.4	DIMENSIONNEMENT DES CONVERTISSEURS	62
3.4.1	Dimensionnement du Sepic	62
3.4.2	Dimensionnement du Buck-Boost	66
3.4.3	Dimensionnement de l'onduleur	67
3.4.4	Dimensionnement du stockage	68
3.5	CONCLUSION	69

3.1 Introduction

Après qu'on a bien défini les convertisseurs et le stockage dans le chapitre précédent, on va commencer dans ce chapitre à dimensionner les éléments composant notre système photovoltaïque, et toutes les conditions nécessaires (éclairage, puissances nécessaires, ...etc) pour que notre système soit efficace le maximum possible.

Alors, afin de bien dimensionner l'installation, il devra suivre les étapes suivantes :

- choix du site
- estimer la consommation d'énergie journalière
- connaître l'ensoleillement de notre site d'installation
- dimensionner la source PV pour fournir la puissance estimée
- dimensionner les convertisseurs
- dimensionner les batteries [10]

3.2 Étude des paramètres environnemental

3.2.1 Choix du site

Dans cette étude, on considère le cas réel du dimensionnement de notre installation PV située dans le pôle universitaire à Chetouane, Tlemcen, Algérie, d'où ces coordonnées géographiques sont :

- Latitude : $34^{\circ}55'10''$ Nord
- Longitude : $1^{\circ}18'6''$ Ouest
- Altitude par rapport au niveau de la mer : 595 m
- L'orientation des panneaux : 0° sud, 15° par rapport à l'horizontale.

La position exacte souhaitée de notre installation PV est interprétée dans la figure 3.1 :

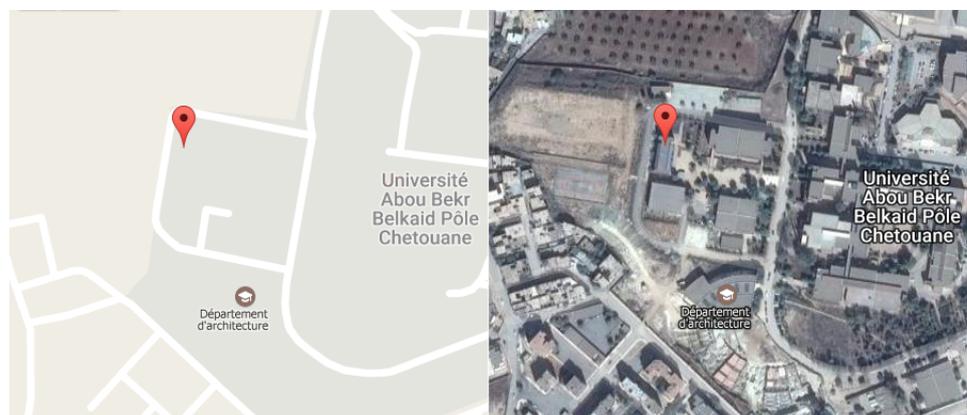


FIGURE 3.1 – Position souhaitée pour l'installation PV

3.2.2 Estimation de la consommation journalière

La facture d'électricité est encore le moyen le plus simple de connaître sa consommation, mais on n'en possède pas dans tous les cas. Il faut alors se renseigner sur la consommation de chaque appareil, ou se contenter d'une estimation la plus précise possible.

- Détermination de la consommation journalière

Cette étape comporte peu de calculs, mais demande relativement beaucoup de réflexion car une erreur à ce stade faussera vos résultats jusqu'à la fin. Il s'agit d'estimer la consommation d'équipements supposés connus. L'objectif est d'obtenir la consommation totale moyenne par jour. L'énergie totale moyenne nécessaire chaque jour E_c (Wh/j) est la somme des consommations énergétiques des divers équipements constituant le système à étudier, à savoir la télévision, les lampes d'éclairage, les appareils électroniques,ect... [10]

Remarque : La consommation journalière de l'énergie se varie en fonction de plusieurs paramètres comme le temps (le jours ou la nuit),la température (chaud ou froid), la saison (été ou hiver), ...etc , prennent en considérations tous ces paramètres, on a choisir de faire comme estimation, la moyenne de consommation journalière sur toute l'année.

Le tableau 3.1 suivant nous aidera a présenter les différents équipements branchés au GPV ainsi que leur consommation journalière en Wh/j et leur duré d'utilisation en heur :

Appareils	Nombres	Puissance (W)	Temps d'utilisation (h)	Consommation (Wh/j)
Lampe	15	20	3	900
Télévision	4	210	3	2520
Ordinateur	9	280	4	10080
Climatiseur	3	450	3	4080
Réfrigérateur	1	310	24	7440
Divers	3	350	2	2100
Total	35	7000	39	27120

TABLE 3.1 – Consommation journalière estimée

Alors l'énergie journalière consommé sera donc la somme de la consommation par jours de tous les appareils branchées dans le système, pour cela on note :

$$E_c = \sum \text{Consommations}(Wh/j)$$

Alors l'énergie consommé sera :

$$E_c = 900 + 2520 + 10080 + 4080 + 7440 + 2100 = 27120Wh/j$$

3.2.3 Estimation de l'ensoleillement

L'étape suivante consiste, à partir de la consommation déjà calculée, à déterminer le nombre de panneaux dont nous aurons besoin pour produire cette quantité d'énergie. Celle-ci varie en fonction de l'ensoleillement de notre site, il nous faudra donc savoir la quantité d'ensoleillement [1].

Mois	H_h	H_{opt}	$H(15)$	T_{24h}	N_{DD}
Jan	2830	4500	5730	9,1	240
Fev	3610	5070	5710	8,4	189
Mar	5030	6010	5720	11,0	119
Avr	5670	5930	5960	14,2	64
Mai	6670	6290	6670	16,9	4
Juin	7690	6870	7320	23,9	0
Jui	7740	7080	7420	24,9	0
Aug	6990	7040	7650	24,9	0
Sep	5490	6320	7070	20,9	8
Oct	4450	5930	6300	17,7	33
Nov	3090	4760	5990	12,8	187
Dec	2590	4350	5700	10,4	199
Année	5160	5850	5780	15,9	104

TABLE 3.2 – Estimation mensuelle de l'irradiation

où :

H_h : Irradiation sur un plan horizontal (Wh/m²/jour)

H_{opt} : Irradiation sur un plan avec l'inclinaison optimale (Wh/m²/jour)

$H(15)$: Irradiation sur un plan incliné :15 °C. (Wh/m²/jour)

T_{24h} : Température moyenne journalière (24h) (° C)

N_{DD} : Nombre de degrés-jours de chauffage (-)

On remarque que le mois de décembre est le moins d'ensoleillement le plus défavorable avec une production de 5700Wh/m²/jour pour une inclinaison optimale égale à 15°.

3.2.4 Calculer la puissance de l'installation

Pour calculer la puissance nécessaire pour notre installation on doit calculer d'abord l'énergie produit :

$$E_p = \frac{E_c}{K_p} = \frac{27120}{0.65} = 41723Wc$$

Maintenant nous savons quelle est notre consommation quotidienne et l'ensoleillement de notre site, il nous faut calculer alors la production quotidienne.

La formule à appliquer pour ce calcul est :

$$P_c = \frac{E_P}{I_r}$$

P_c : Puissance crête

K_p : Coefficient des pertes (les pertes dans les convertisseurs + les câbles).

I_r :Irradiation du mois le plus défavorable

Alors la puissance nécessaire pour l'installation est :

$$P_c = \frac{41723}{5.7Wh/m^2} = 7320Wc$$

3.3 Dimensionnement des panneaux photovoltaïques

Il est rarement ou les installations photovoltaïques donnent la puissance voulu que le consommateur avait besoin, donc le système peut être surdimensionné ou sous dimensionné, pour cette raison le choix des panneaux se détermine suivant la déférence entre la puissance donnée par le GPV et la puissance souhaitée tel qu'elle soit la plus petite possible. Si cette déférence est élevée et positive donc le système sera surdimensionné et par conséquent sa coute chère, par contre si elle est grande par valeur négative on tombe sur le risque de mal fonctionnement du système [10].

3.3.1 Type des panneaux solaires utilisés

Les panneaux utilisés dans note étude sont les panneaux SunPower305, de la société SunPower (Annexe A, figure 25).

3.3.2 Caractéristiques des panneaux solaires utilisés

Le panneau SunPower305 a les caractéristiques électriques et mécaniques présenté dans les tableaux (3.3 et 3.4) :

- caractéristiques électriques :

Peak Power(+/- k %)	Pmax	305 W
Rated Voltage	V_{mp}	54.7 V
Rated Current	I_{mp}	5.58 A
Open Circuit Voltage	V_{oc}	64.2 V
Short Circuit Current	I_{sc}	5.96 A
Maximum System Voltage	IEC, UL	1000 V, 600 V

TABLE 3.3 – Caractéristiques électriques du panneau SunPower305

- caractéristiques mécaniques :

Solar Cells	96 SunPower all-back contact monocrystalline
Front Glass	4.0 mm (5/32in) tempered
Output Cables	IP-65 rated with 3 bypass diodes
Frame	Clear anodized aluminum alloy type 6063
Weight	24 kg , 53 lbs

TABLE 3.4 – Caractéristiques mécaniques du panneau SunPower305

- Dimensions du panneau :

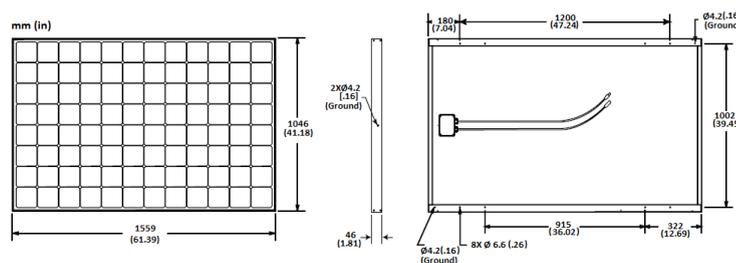


FIGURE 3.2 – Dimensions du panneau SunPower305

3.3.3 Calcul de nombre des panneaux nécessaire

A partir de la puissance crête des panneaux SunPower 305 on peut déterminer le nombre de panneaux solaire nécessaires à l'installation. pour cela on utilise la formule suivante :

$$N_p = \frac{P_c}{P_p}$$

où :

P_p : La puissance d'un panneau.

P_c : La puissance crête.

Alors le nombre de panneaux sera :

$$N_p = \frac{7320}{305} = 23,99$$

Or il impossible d'installer 23,99 panneaux, alors en arrondi à 24.

Remarque : Le meilleur type de branchement pour avoir une tension de 257V c'est de mettre 4 panneaux en séries et 6 autre en parallèle.

3.3.4 Schéma du modèle SunPower305 sur Matlab

La figure 3.3 présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque du modèle utilisé sous éclairnement.

Il correspond à un générateur de courant I_{ph} monté en parallèle avec une diode.

Deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma pour tenir compte des phénomènes dissipatifs au niveau de la cellule. Ces résistances ont une certaine influence sur la caractéristique $I(V)$ de la cellule :

– La résistance série R_s est la résistance interne de la cellule dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.

– La résistance shunt R_p est due à un courant de fuite au niveau de la jonction ; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée [10].

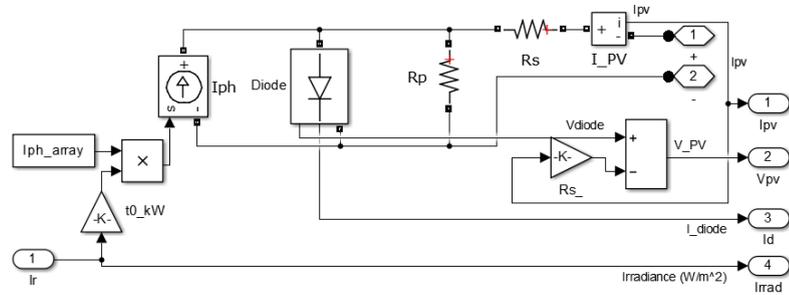


FIGURE 3.3 – Modèle SonPower305 sur Matlab

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

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (3.1)$$

Avec :

I_{ph} : Photo-courant, il s'exprime comme suite :

$$I_{ph} = [I_{cc} + K_i \cdot (T_{mod} - T_r)] \cdot \frac{G}{1000} \quad (3.2)$$

Où :

$$T_{mod} = \frac{NOCT - 20}{800} \cdot G + T + T_{ref} \quad (3.3)$$

$T_r = 298$

$K_i = 0,06$

$NOCT = 45$

$T_{ref} = 273$

G : l'irradiation

Le courant qui circule dans la diode I_D est déterminé par la relation suivante :

$$I_D = I_s \left[e^{\left(\frac{V_{pv}}{N_s} + I_{pv} \cdot R_s \right) \cdot \left(\frac{q}{n \cdot K \cdot T_{mod}} \right)} - 1 \right] \quad (3.4)$$

Où :

I_s est le courant de saturation de la diode.

$$I_s = I_{cr} \cdot \left(\frac{T_{mod}}{T_r} \right)^3 \cdot e^{\left(\frac{q \cdot E_g}{n \cdot K} \right) \cdot \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_{mod}} \right)} \quad (3.5)$$

V_{pv} : Tension aux bornes de la cellule,
 n : Facteur d'idéalité de la diode ($n= 1,403$)
 q : Charge de l'électron($q=1,6021e^{-19}C$)
 k : Constante de Boltzman ($K=1,3854e^{-23}J/K$),
 T : Température de la cellule en Kelvin.
 $E_g= 1,11$
 R_s : Résistance série ($R_s=5e^{-3}\Omega$)
 N_s : Nombre des cellules en série ($N_s=60$)
 $I_{cr}=3,047e^{-7}$

La relation du courant circulant dans la résistance shunt I_{sh} est :

$$I_{sh} = \left(\frac{V_{pv}}{N_s} + (I_{pv} \cdot R_s) \right) \cdot \frac{1}{R_p} \quad (3.6)$$

Où :

R_p : Résistance shunt

Pour vérifier ces équations on va définir le bloc du GPV (un seul panneau) présenté sur la figure 3.3 comme sous-mask et on va le tester sous une irradiation de $1000W/m^2$. Après la simulation on trouve la valeur de tension exact dans le display $V_{Co} = 64.2$ est la même que seul prédéfini dans le datasheet, pour cela on peut dire que notre panneau fonction parfaitement est pré pour l'utilisé dans la simulation générale du système PV.

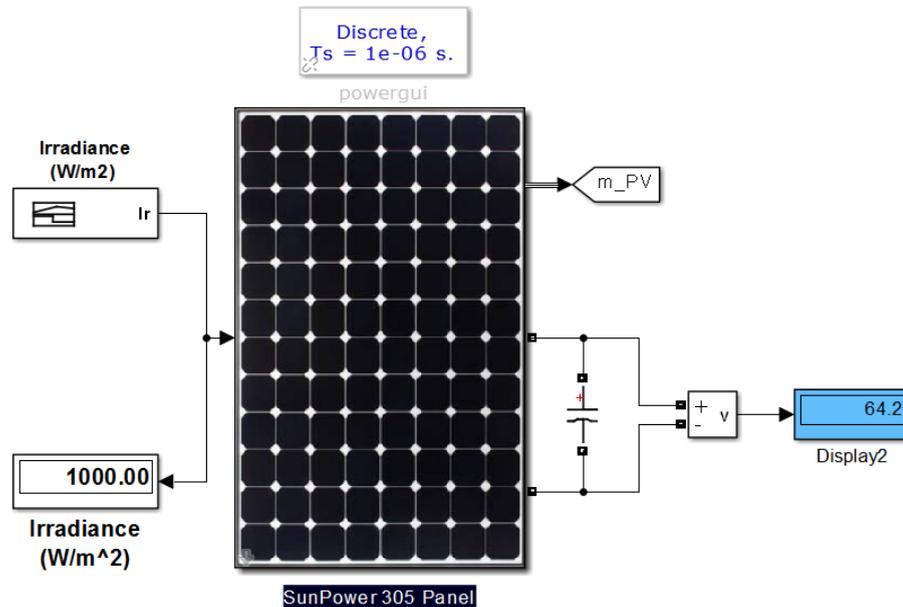


FIGURE 3.4 – Schéma bloc du GPV sous Matlab Simulink

3.4 Dimensionnement des convertisseurs

Dans un premier temps, nous étudierons le fonctionnement des convertisseurs afin de définir les relations permettant de dimensionner les composants de ces convertisseurs. Puis, à partir, d'un cahier des charges, nous dimensionnerons les éléments qui composent ces convertisseurs [16].

Pour le cahier des charges on note : à partir d'une tension d'entrée de 257 V, nous souhaitons obtenir une tension de sortie de 350V, le convertisseur devra délivrer une puissance de 7000W. Soit $I_{OUT} = 20A$ avec une charge $R = 17,5 \Omega$ et la tension de sortie acceptera une ondulation de $\pm 2\%$, soit environ $\pm 7V$. La fréquence de découpage est de 100kHz.

Remarque : Pour tout duré opérationnel de la simulation des différent éléments (panneaux, convertisseurs, batterie,...) sur Matlab, on a choisis provisoirement de mettre une charge $R = 17.5\Omega$ a fin d'obtenir les résultats et les graphes nécessaires pour satisfaire notre cahier de charge.

3.4.1 Dimensionnement du Sepic

Le dimensionnement du convertisseur Sepic est la base de notre étude, alors dans cette partie on va essayé de dimensionner ce convertisseur de tel sort que ces paramètres internes soient compatible avec celles de système PV souhaité, alors le calcul de ces paramètres ce fait comme suit :

3.4.1.1 Dimensionnement des paramètres

• Rapport cyclique

En supposant un rendement de 100 % on aura la relation suivante

$$\alpha = \frac{V_s + V_D}{V_e + V_s + V_D} \quad (3.7)$$

Avec V_e la tension d'entrée, V_s la tension de sortie et V_D la tension de seuil de la diode. Avec un rapport cyclique proche de 50 % , la tension d'entrée est égale à la tension de sortie, le gain est unitaire.

Le rapport cyclique varie en fonction de la tension d'entrée appliquée afin d'avoir une tension de sortie constante [16].

Le rapport cyclique maximum est :

$$\alpha_{MAX} = \frac{V_s + V_D}{V_{e(MIN)} + V_s + V_D} \quad (3.8)$$

Le rapport cyclique minimum est :

$$\alpha_{MIN} = \frac{V_s + V_D}{V_{e(MAX)} + V_s + V_D} \quad (3.9)$$

- **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 :

$$\Delta I_L = I_e \times 40\% = I_s \times \frac{V_s}{V_{e(MIN)}} \times 40\% \quad (3.10)$$

Soit les valeurs d'inductances calculées par :

$$L_1 = L_2 = L = \frac{V_{e(MIN)}}{\Delta I_L \times f} \times \alpha_{MAX} \quad (3.11)$$

Avec f la fréquence de découpage.

Pour s'assurer que le courant dans l'inductance ne sature pas, le courant crête est donné par :

$$I_{L1(Peak)} = I_s \times \frac{V_s + V_D}{V_{e(MIN)}} \times \left(1 + \frac{40\%}{2}\right) \quad (3.12)$$

$$I_{L2(Peak)} = I_s \times \left(1 + \frac{40\%}{2}\right) \quad (3.13)$$

Si les inductances L_1 et L_2 sont bobinées sur le même circuit magnétique, les valeurs d'inductances sont remplacées par $2L$ à cause de la mutuelle inductance. Les valeurs d'inductances sont alors :

$$L'_1 = L'_2 = \frac{L}{2} = \frac{V_{e(MIN)}}{2 \times \Delta I_L \times f} \times \alpha_{MAX} \quad (3.14)$$

- **Condensateur de couplage**

Le condensateur de couplage doit être capable de laisser passer le courant efficace donné par :

$$I_{C1(RMS)} = I_s \times \sqrt{\frac{V_s + V_D}{V_{e(MIN)}}} \quad (3.15)$$

Le condensateur est dimensionné à partir de l'ondulation de tension crête à crête voulue définie par la formule suivante :

$$\Delta V_{C1} = \frac{I_s \times \alpha_{MAX}}{C_1 \times f} \quad (3.16)$$

- **Condensateur de de filtrage**

Le condensateur C_2 à la sortie du convertisseur Sepic permet de filtrer la tension et de maintenir celle-ci constante. La formule permettant de dimensionner le condensateur est donnée par :

$$C_2 = \frac{I_s \times \alpha_{MAX}}{V_{ripple} \times 0.5 \times f} \quad (3.17)$$

Avec I_s le courant dans la charge, V_{ripple} l'ondulation de tension.

- **Transistor**

Le transistor doit être capable de supporter une tension $V_k = V_e + V_s$, et être traverser par un courant crête égal à $I_{k(peak)} = I_{L1(peak)} + I_{L2(peak)}$.

Le courant efficace est donné par :

$$I_{k(RMS)} = I_s \times \sqrt{\frac{(V_s + V_{e(MIN)} + V_D) \times (V_s + V_D)}{V_{e(MIN)}^2}} \quad (3.18)$$

Il faudra veiller à ce que la puissance dissipable par le transistor soit inférieure aux pertes par conduction et par commutations

- **Diode**

La diode possède les mêmes contraintes que le transistor, elle doit supporter un courant $I_{D(peak)} = I_{k(peak)}$. Elle doit résister aussi à une tension inverse de $V_D = V_{e(MAX)} + V_{s(MAX)}$. Le courant moyen dans la diode est égal au courant de sortie I_s .

Il faudra veiller à ce que la puissance dissipable par la diode soit inférieure aux pertes par conduction et par commutations. Il est recommandé de choisir des diodes Schottky pour limiter ses pertes [16].

3.4.1.2 Calcul numérique des paramètres

- **Rapport cyclique**

En négligeant la chute de tension aux bornes de la diode, on trouve

$$\alpha = \frac{V_s}{V_e + V_s} = \frac{350}{350 + 256,8} = 0,5768 = 57,68\% \quad (3.19)$$

- **Inductances** On autorise une ondulation de 40% le courant d'entrée maximal pour la tension d'entrée minimale. L'ondulation de courant est :

$$\Delta I_L = I_e \times 40\% = I_s \times \frac{V_s}{V_{e(MIN)}} \times 40\% = 20 \times \frac{350}{256,8} \times 40\% = 10,903 \quad (3.20)$$

Soit les valeurs d'inductances calculées par :

$$L_1 = L_2 = L = \frac{V_{e(MIN)}}{\Delta I_L \times f} \times \alpha_{MAX} = \frac{350}{10,903 \times 100000} \times 0,5768 = 1,3585 \times 10^{-4} H \quad (3.21)$$

Le courant maximum est :

$$I_{L1(Peak)} = I_s \times \frac{V_s + V_D}{V_{e(MIN)}} \times \left(1 + \frac{40}{2}\right) = 20 \times \frac{350}{256,8} \times \left(1 + \frac{40\%}{2}\right) = 32,71A \quad (3.22)$$

$$I_{L2(Peak)} = I_s \times \left(1 + \frac{40}{2}\right) = 20 \times \left(1 + \frac{40\%}{2}\right) = 24A \quad (3.23)$$

- **Condensateur de couplage**

Le courant efficace dans C_1 est :

$$I_{C1(RMS)} = I_s \times \sqrt{\frac{V_s + V_D}{V_{e(MIN)}}} = 20 \times \sqrt{\frac{350}{256,8}} = 23,3489A \quad (3.24)$$

En prenant une ondulation de tension de l'ordre de 40 % la tension d'entrée, on obtient :

$$C_1 = \frac{I_s \times \alpha_{MAX}}{\Delta V_{C1} \times f} = \frac{20 \times 0,5768}{40\% \times 256,8 \times 100000} = 1,1230 \times 10^{-6} F = 1,123 \mu F \quad (3.25)$$

- **Condensateur de de filtrage**

La tension de sortie accepte une ondulation de 2 %.

$$C_2 = \frac{I_s \times \alpha_{MAX}}{V_{ripple} \times 0,5f} \sqrt{\frac{V_s + V_D}{V_{e(MIN)}}} = \frac{20 \times 0,5768}{2 \times 0,5 \times 100000} = 1,1536 \times 10^{-4} F \quad (3.26)$$

- **Transistor**

Le transistor doit être capable de supporter une tension :

$V_k = V_e + V_s = 350 + 256,8 = 606,8V$, et peut être traverser par un courant crête égal à $I_{k(peak)} = I_{L1(peak)} + I_{L2(peak)} = 32,71 + 24 = 56,71A$,

Le courant efficace est passant dans le transistor est :

$$I_{k(RMS)} = I_s \times \sqrt{\frac{(V_s + V_{e(MIN)} + V_D) \times (V_s + V_D)}{V_{e(MIN)}^2}} = 20 \times \sqrt{\frac{350 + 256,8}{256,8^2} \times (350)} = 35,8915A \quad (3.27)$$

- **Diode**

La diode possède les mêmes contraintes que le transistor, elle doit supporter un courant $I_{D(peak)} = I_{k(peak)} = 32,71 + 24 = 56,71A$. Elle doit aussi résister à une tension inverse de $V_D = V_{e(MAX)} + V_{s(MAX)} = 350 + 256,8 = 606,8V$.

Le courant moyen dans la diode est égal au courant de sortie I_s .

Pour déterminer les résultats obtenue par le calcul analytique précédent, on propose d'utilisé aussi le programme Matlab suivant qui assure un calcul précis et rapide des différents paramètres du convertisseur Sepic, on peut alors savoir exactement nos valeurs assez rapide que le calcul analytique :

```

Vin=256.8 ;
Vout=350 ;
Iout=20 ;
f=1e5 ;
alpha=Vout/(Vin+Vout)
DI=Iout*0.4*Vout/Vin
L1=alpha*Vin/(DI*f)
L2=L1
Ic1=Iout*sqrt(Vout/Vin)
C1=Iout*alpha/(0.4*Vin*f)
C2=Iout*alpha/(0.5*2*f)

```

Remarque : les résultats obtenues par le calcul numérique des paramètres est pratiquement le même que celui obtenue par le programme de Matlab, pour cela on peut confirmer alors nous résultats trouvés pour intégrer en toute sécurité le convertisseur Sepic dans notre système PV.

3.4.1.3 Schéma du Sepic sur Matlab

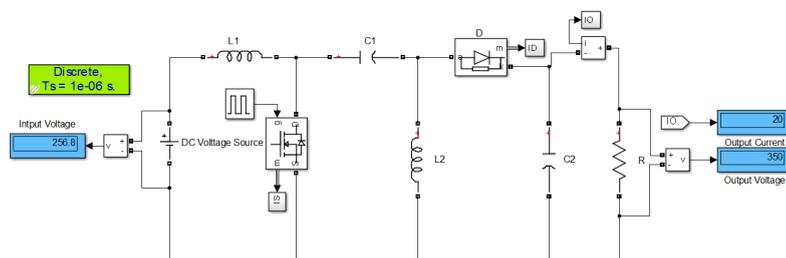


FIGURE 3.5 – Bloc du convertisseur Sepic sous Matlab

3.4.2 Dimensionnement du Buck-Boost

D'après notre recherche on a pas trouver un dimensionnement exact et compatible avec notre étude pour cela on a choisit de mettre un bloc a partir des équations du Buck-Boost déjà définit dans le chapitre 2, d'où son modèle équivalent sur matlab et comme suit :

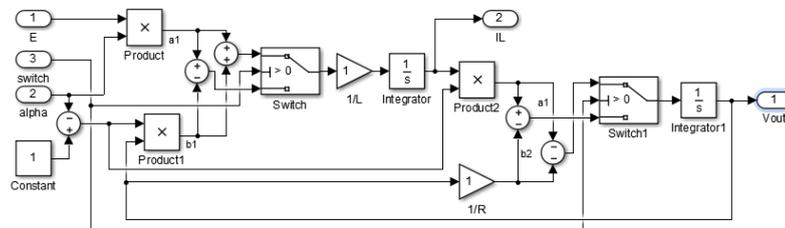


FIGURE 3.6 – Schéma du modèle SIMULINK de hacheur Buck-Boost

3.4.4 Dimensionnement du stockage

Le stockage était toujours un grand problème a discuté dans les études et les recherches concernant le sujet, avec une quantité d'énergie assez intéressante (7000W), un vrais challenge était pris pour dimensionner un modèle réel de notre système PV planifié, par conséquent , on a trouvé pas mal de problème avec les capacités et le nombre des batteries nécessaire pour stocké une quantité d'énergie pareil, pour cela on choisit de re-dimensionné un modèle de batterie près déjà dans Simulink-SimPower Systems pour travail avec.

Les caractéristiques techniques des batteries utilisé sont interpréter dans la figure 26 (Annexe B).

3.4.4.1 Paramètres général d'une batterie

- **Energie stocké** : Il doit tenir compte la profondeur de décharge P_r des batteries pour connaître l'énergie E_s faut il stocker. Pour notre cas on adopte 40%.

$$E_s = \frac{E_c}{P_r}$$

- **Autonomie** :

Il peut y avoir des périodes de manque d'ensoleillement, pour cela il faut prend en considération le nombre de jour d'autonomie N_j qu'on va prendre 3 jours pour notre étude.

- **Capacité de stockage** : La capacité de stockage C_s en Wh est déterminer comme suit :

$$C_s = E_s \cdot N_j$$

- **Capacité des batteries** : Pour déterminer la capacité des batteries C_b en Ampère heure, on divise la capacité de stockage C_s par la tension des batteries V_b (48V).

$$C_b = \frac{C_s}{V_b}$$

- **Nombre de batteries** : Le nombre de batteries N_b à installer est le rapport de la capacité C_b par la capacité d'une seul batterie C_{bat} .

$$N_b = \frac{C_b}{C_{bat}}$$

3.4.4.2 Calcul numérique des paramètres

le calcul des paramètres du stockage se fait par la détermination des différents éléments techniques interne et externe des batteries utilisé, a partir de datasheet interprété dans la figure 26 (Annexe B).

- **Energie stocké**

$$E_s = \frac{E_c}{P_r} = \frac{27120}{0,4} = 67800Wh/j$$

- **Capacité de stockage**

$$C_s = E_s \cdot N_j = 67800 \cdot 3 = 203400Wh$$

- **Capacité des batteries**

$$C_b = \frac{C_s}{V_b} = C_b = \frac{203400}{48} = 4238Ah$$

- **Nombre de batteries**

$$N_b = \frac{C_b}{C_{bat}} = \frac{4238}{200} = 21,19$$

Or il impossible d'installer 21,19 batteries, alors en arrondi à 22.

3.5 Conclusion

Après une présentation global, dans ce chapitre, de dimensionnement des différents éléments constitutifs de notre installation photovoltaïque, ses besoins en énergie et parallèlement le stockage par batteries, le prochaine chapitre sera consacré aux simulations des ces éléments et l'interprétation des résultats obtenues.

Chapitre 4

Simulation numériques et interprétation

SOMMAIRE

4.1	INTRODUCTION	71
4.2	VALIDATION DU SYSTÈME PV	71
4.3	VALIDATION DU DIMENSIONNEMENT DE SEPIC	72
4.4	VALIDATION DU DIMENSIONNEMENT DE BUCK-BOOST	73
4.5	VALIDATION DU DIMENSIONNEMENT DE L'ONDULEUR	74
4.6	VALIDATION DU MODÈLE DE STOCKAGE	75
4.6.1	État de charge	75
4.6.2	État de décharge	76
4.7	VALIDATION DU SYSTÈME PV SANS STOCKAGE	76
4.7.1	Test 1 : Éclairement fixe	77
4.7.2	Test 2 : Éclairement variable	78
4.8	VALIDATION DU SYSTÈME PV AVEC STOCKAGE	80
4.9	VALIDATION DU SYSTÈME PV AVEC ONDULEUR	81
4.10	CONCLUSION	81

4.1 Introduction

On se basons sur le dimensionnement présenté dans le chapitre précédent, une validation par simulation est utilisée dans ce chapitre pour tester le comportement de chaque élément du système, et ensuite la réaction de toute le système PV dans des différents niveau d'éclairement.

4.2 Validation du système PV

Pour satisfaire nos besoins d'énergie on a validé 24 panneaux a fin de générer une puissance de 7000W ..

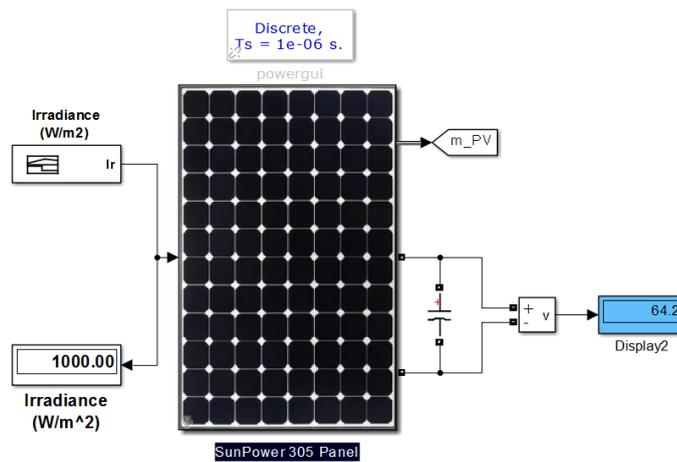


FIGURE 4.1 – Schéma du panneau utilisé

• Résultats de la simulation

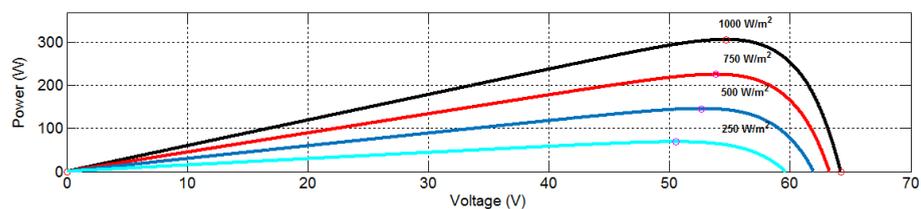


FIGURE 4.2 – Caractéristiques $P(V)$

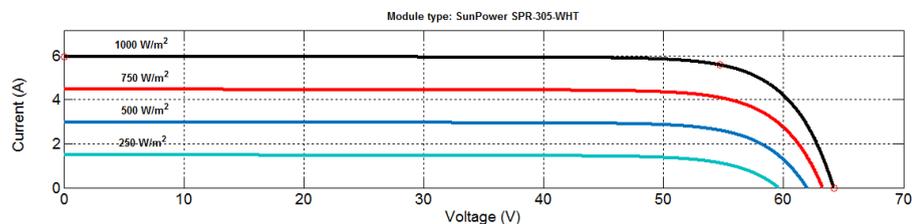


FIGURE 4.3 – Caractéristiques $I(V)$

• Interprétation

les figures 4.2 et 4.3 montrent les caractéristiques du courant et de puissance en fonction de la tension, on remarque que, à une température constante de 25° :

- Le courant le courant I_V est directement proportionnel au rayonnement à ces niveaux d'éclairage.
- La tension V_V augmente jusqu'elle atteint sa valeur maximal a $305W$, ensuite elle décroît dans un intervalle du temps assez courte.

4.3 Validation du dimensionnement de Sepic

Comme c'est montré dans la figure 4.4, le Sepic est connecté à une source de tension DC ,et un générateur d'impulsion pour la commande, ensuite on fixe la tension du générateur à 257 V et on branche parallèlement une résistance d'une valeur de $17,5\Omega$.

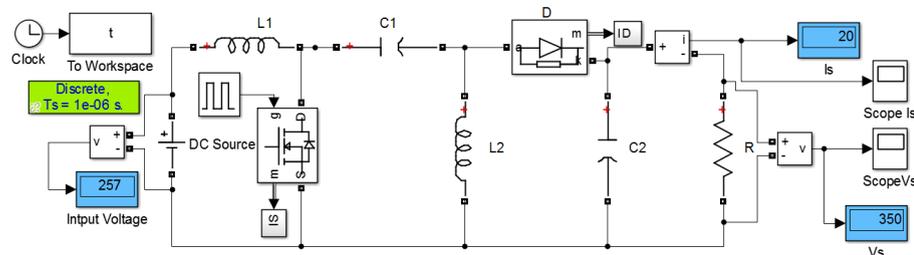


FIGURE 4.4 – Schéma du convertisseur Sepic avec un générateur DC

• Résultats de la simulation

Après la simulation on obtient les graphes suivantes :

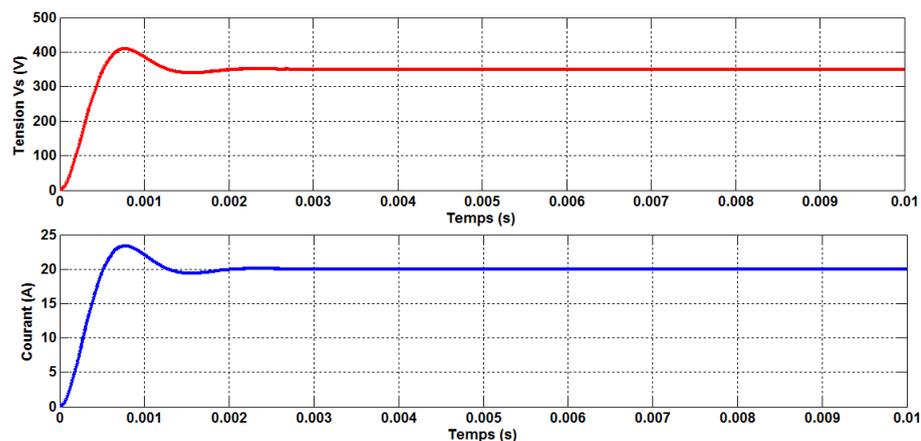


FIGURE 4.5 – Allures du courant et de tension de sortie

- **Interprétation**

La figure 4.5 montre l'évolution temporelle de la tension V_s et du courant I_s à la sortie du convertisseur Sepic, on remarque que V_s et I_s atteignent ces valeurs souhaité dans le régime permanent à 350 V et 20 A respectivement.

4.4 Validation du dimensionnement de Buck-Boost

La figure 4.6 montre un bloc de convertisseur Buck-Boost alimenté par une source de tension de 350V équivalente a celle générer par le convertisseur Sepic, le rôle du Buck-Boost dans cette partie de la simulation est d'adapté les niveaux de tension entre sortie du Sepic le système de stockage souhaité.

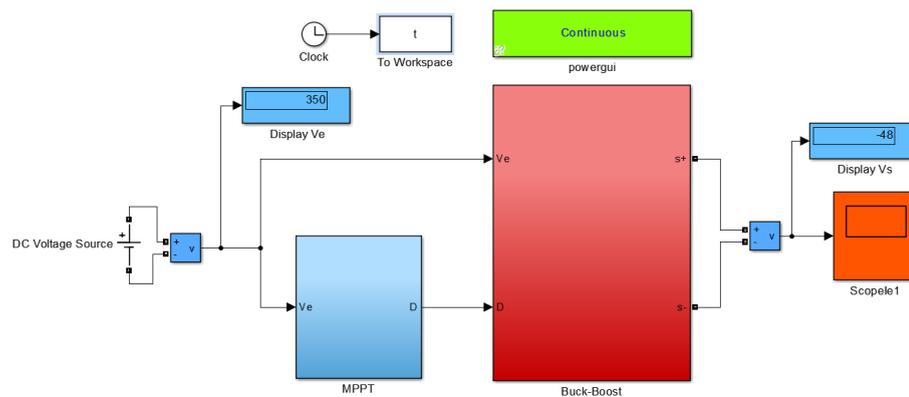


FIGURE 4.6 – Bloc du convertisseur Buck-Boost

- **Résultats de la simulation**

Après la simulation on obtient les graphes suivantes :

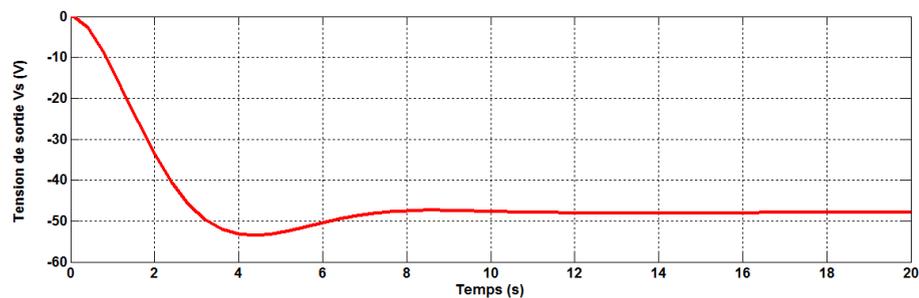


FIGURE 4.7 – Tension de sortie du Buck-Boost

- **Interprétation**

On remarque que la tension de sortie du convertisseur Buck-Boost est négative par rapport à la tension d'entrée. Son amplitude peut être supérieure ou inférieure à celle de la tension d'entrée selon la valeur du rapport cyclique. C'est un abaisseur-élevateur-inverseur en tension.

4.5 Validation du dimensionnement de l'onduleur

Pour convertir du continu en alternatif nous avons utilisé un onduleur monophasé branché à une source de tension, avec une charge résistive, le bloc est schématisé dans la figure 4.8 :

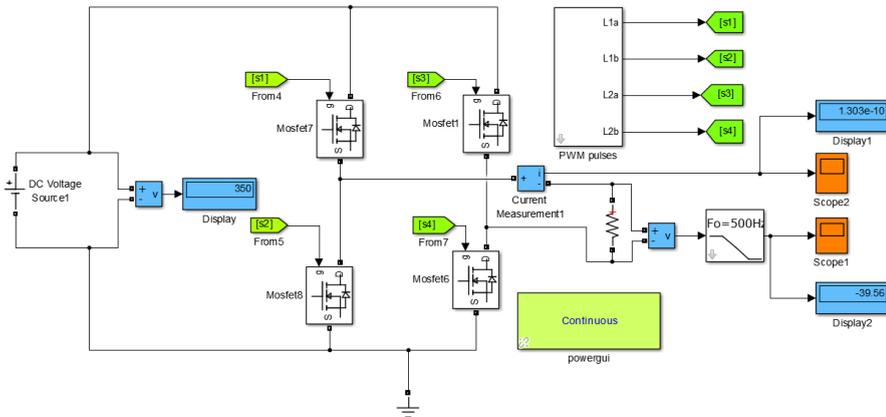


FIGURE 4.8 – Bloc de l'onduleur utilisé

• Résultats de la simulation

Après la simulation on obtient les graphes suivantes :

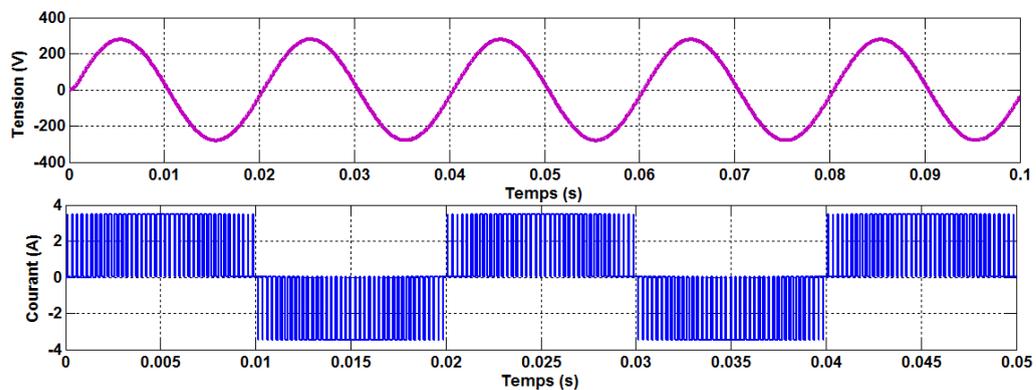


FIGURE 4.9 – Tension et courant de l'onduleur

• Interprétation

Les résultats de simulation obtenus pour une charge résistive montre que cette technique de commande permet de synthétiser une onde en sortie du convertisseur très sinusoïde par effet du filtre utilisé.

On remarque dans la deuxième courbe, une évolution bidirectionnels du courant à la sortie du convertisseur.

4.6 Validation du modèle de stockage

En utilisant une batterie de modèle Simpower System de Matlab, nous avons effectué deux tests (charge et décharge).

4.6.1 État de charge

Le premier essai figure 4.5 consiste à utiliser le Buck-Boost afin de pouvoir adapter le niveau de tension aux conditions du chargement de la batterie.

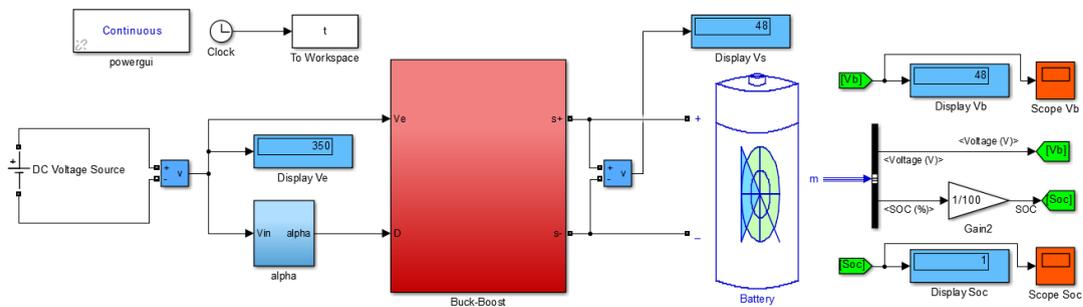


FIGURE 4.10 – Schéma du batterie dans l'état de charge

• Résultats de la simulation

Après la simulation on obtient les graphes suivantes :

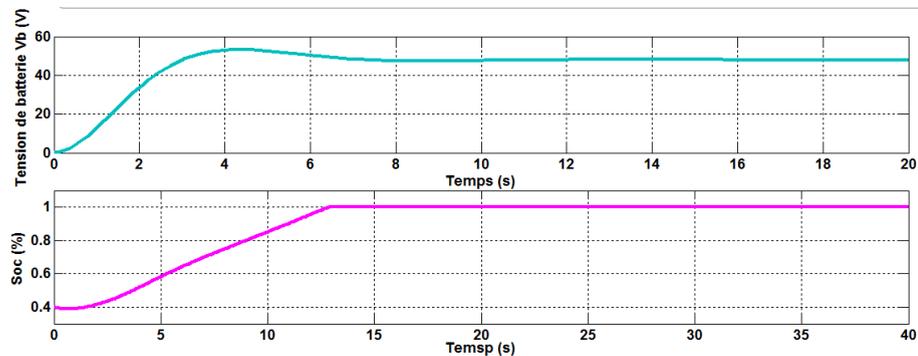


FIGURE 4.11 – Tension et Soc du batteie dans l'état de charge

• Interprétation

- Dans la courbe de la figure 4.11 on peut remarquer clairement le phénomène de chargement de la batterie, d'où la tension augmente à une valeur max avant qu'elle se stabilise à sa valeur nominale 48V.
- Le Soc de charge suit le comportement de tension et augmente, il se stabilise à 100 % après 13 s de simulation.

4.6.2 État de décharge

le deuxième essaie figure 4.12, on a branché la batterie à une charge pour se décharger et nous permettre de voir le phénomène de décharge.

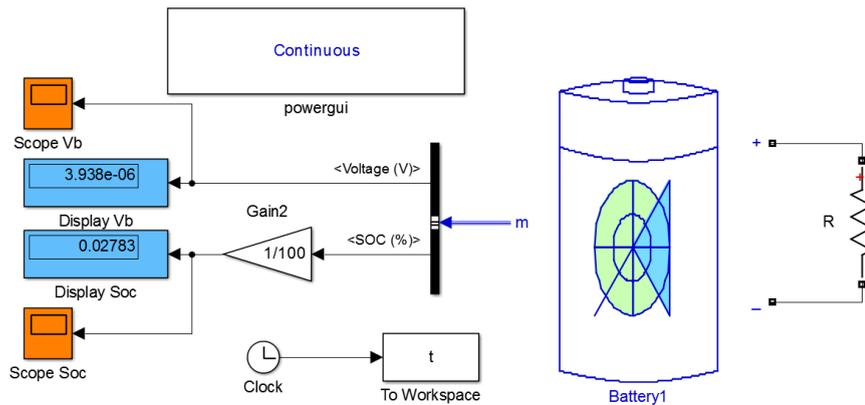


FIGURE 4.12 – Schéma du batterie dans l'état de décharge

• Résultats de la simulation

Après la simulation on obtient les graphes suivantes :

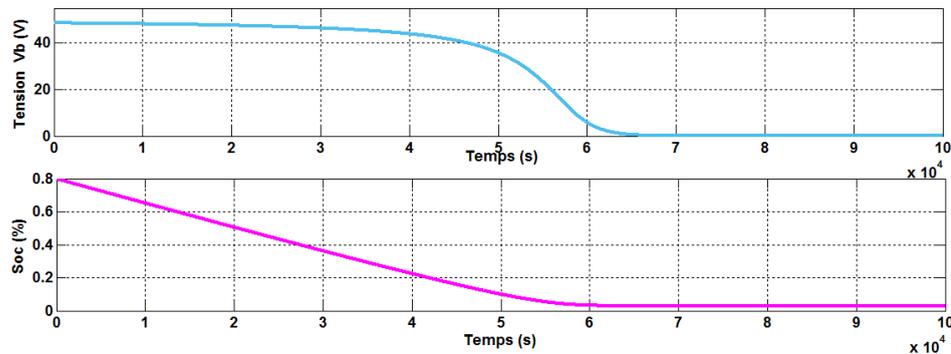


FIGURE 4.13 – Tension et Soc de la batterie dans l'état de décharge

• Interprétation

- Dans le cas de décharge la tension diminue
- Le Soc de charge suit le comportement de tension et augmente, il se stabilise à 100 % après 13 s de simulation.

4.7 Validation du système PV sans stockage

le schéma de la figure 4.14 consiste à utiliser notre panneau SunPower comme une source de tension branché en parallèle avec la charge R et un convertisseur Sepic. A cet étape on teste le système PV sous les différents niveaux d'éclairement possible, les tests suivants montrent le comportement de l'ensemble du système dans chaque scénario.

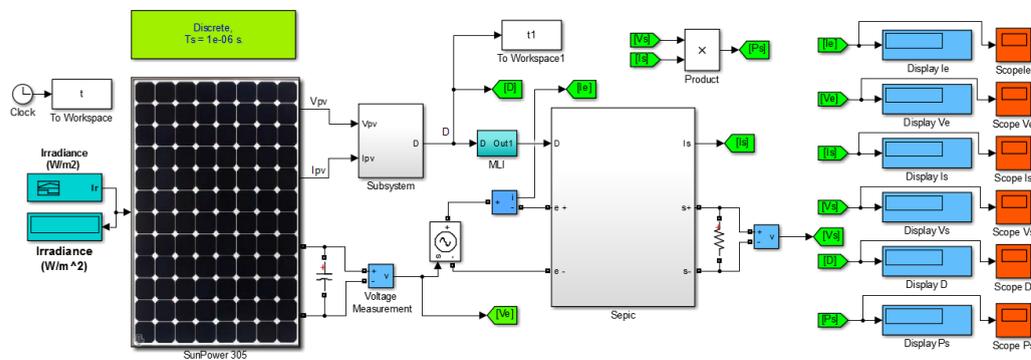


FIGURE 4.14 – Schéma du système PV sans stockage

4.7.1 Test 1 : Éclairement fixe

On suppose, dans ce test que l'éclairement est fixe de $1000\text{W}/(\text{m}^2)$ comme c'est montré dans la figure 4.15,

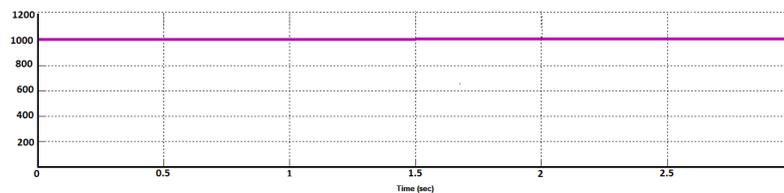


FIGURE 4.15 – Éclairement

- Résultats de la simulation

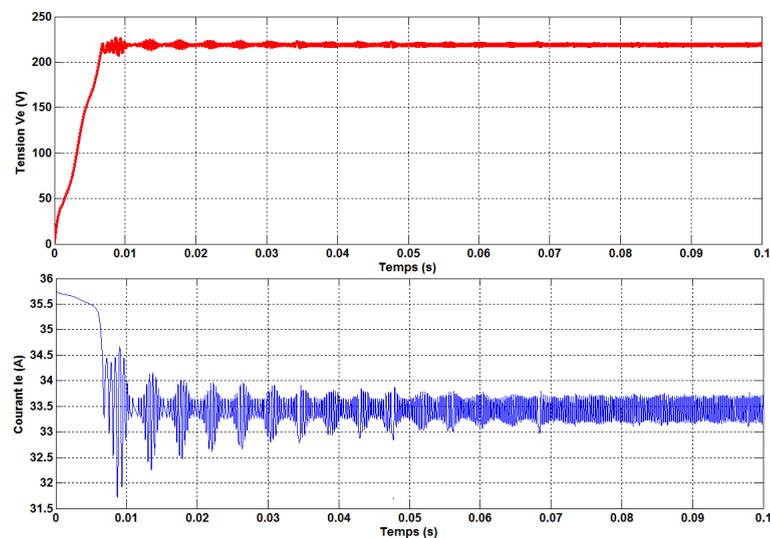


FIGURE 4.16 – Caractéristiques de tension et du courant d'entrée

- **Interprétation**

- Pour la figure 4.17 de la tension dans le régime transitoire on a un dépassement de 5 % , elle arrive jusqu'à 365v puis elle se stabilise dans 353V avec des petites ondulations, et concernant l'allure du courant, il y a un petit dépassement le courant arrive jusqu'à 23A dans le régime transitoire puis il se stabilise a 20A avec des petits ondulations.

4.7.2 Test 2 : Éclairement variable

Pour montrer l'influence de l'éclairement durant une période de 24h sur les caractéristiques du panneau, ou on peut bien savoir la réponse du système PV dans la présence et l'absence de la lumière, pour cela on teste le rendement sous les différents niveau d'éclairement journalière possible (figure 4.19).

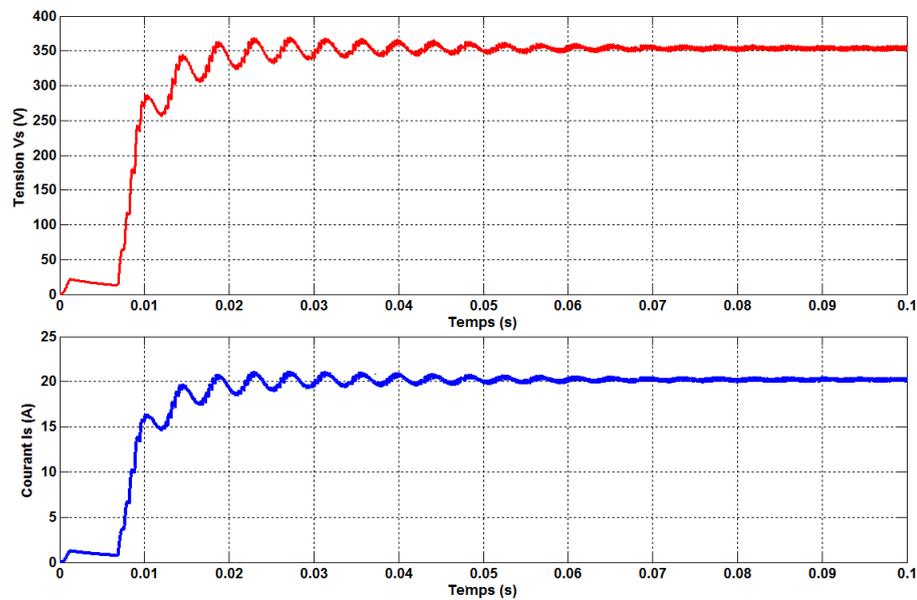
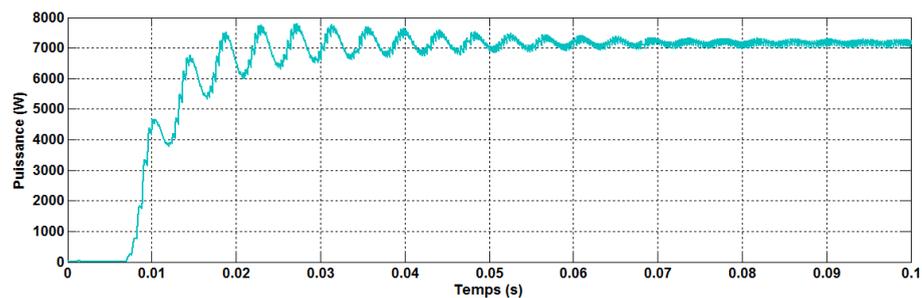


FIGURE 4.17 – Caractéristiques de tension et du courant de sortie

FIGURE 4.18 – Puissance de sortie P_s

- **Résultats de la simulation**

Après la simulation on obtient les graphes suivantes :

- **Interprétation**

D'après les allures sur la figure 4.20 on remarque que les paramètres tension courant et puissance répond au variation de l'éclairement.

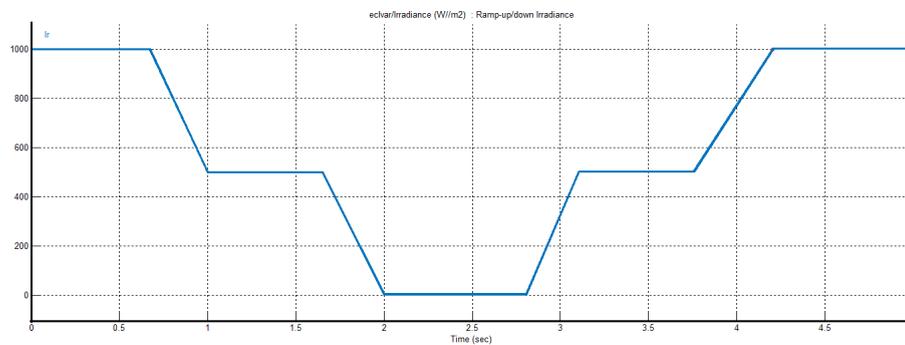


FIGURE 4.19 – Niveaux d'éclairement journalière

4.8 Validation du système PV avec stockage

Maintenant, on va ajouter un système de stockage au bloc précédent, les mêmes essais sont établis.

- **Résultats de la simulation**

Après la simulation on obtient les graphes suivantes :

- **Interprétation**

Les résultats obtenus sont pratiquement les mêmes que dans l'essai de validation de stockage, pour cela on peut dire que notre système fonctionne parfaitement.

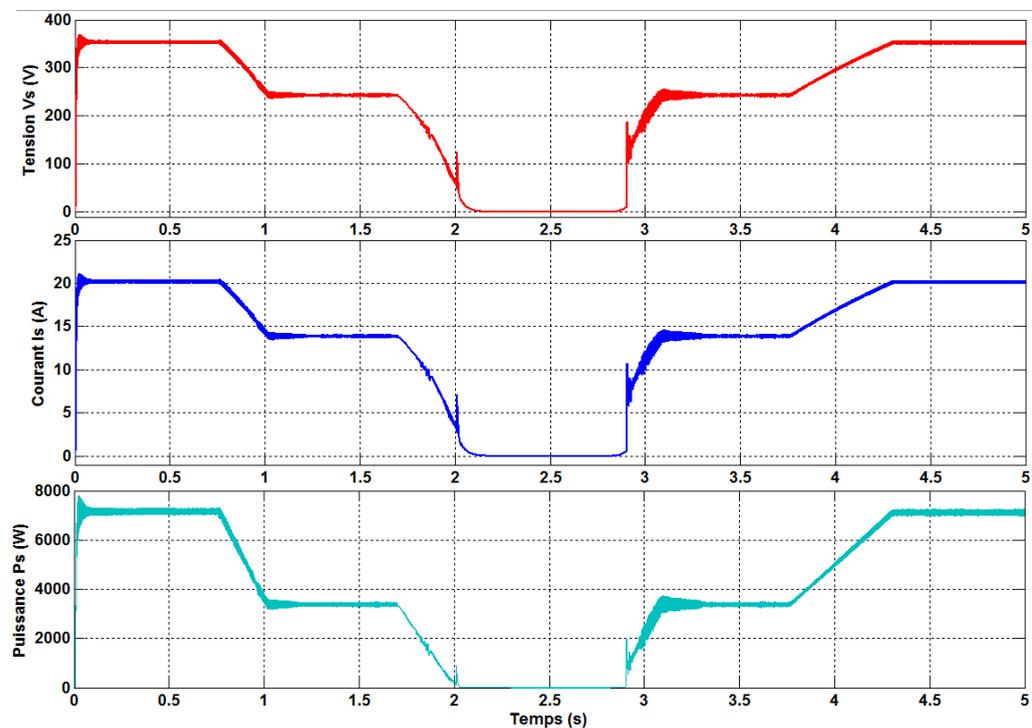


FIGURE 4.20 – Paramètres de sortie

4.9 Validation du système PV avec onduleur

Pour que notre système fonctionne en alternatif on a ajouté le bloc onduleur, alors la figure 4.23 montre le schéma du système.

- **Résultats de la simulation** Après la simulation on obtient les graphes suivantes :

- **Interprétation**

Les résultats obtenue sont pratiquement les mêmes que dans l'essai de validation de stockage, pour cela on peut dire que notre système fonctionne parfaitement.

4.10 Conclusion

Cette partie fournit une vue globale relative à la comportement du système PV. Les diverses simulations ont été testées vis-à-vis de plusieurs types de raccordement afin d'évaluer leur robustesse

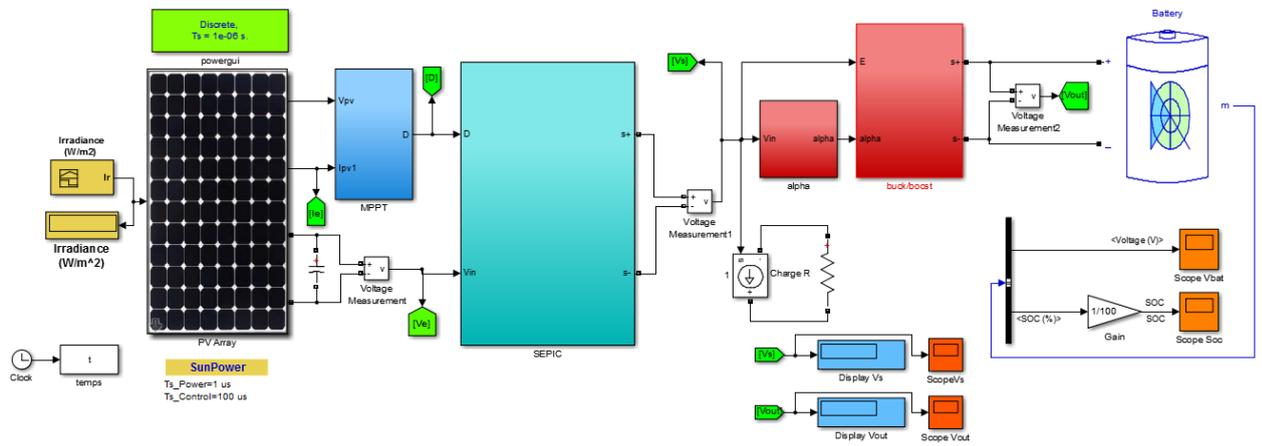


FIGURE 4.21 – Bloc de système PV avec stockage

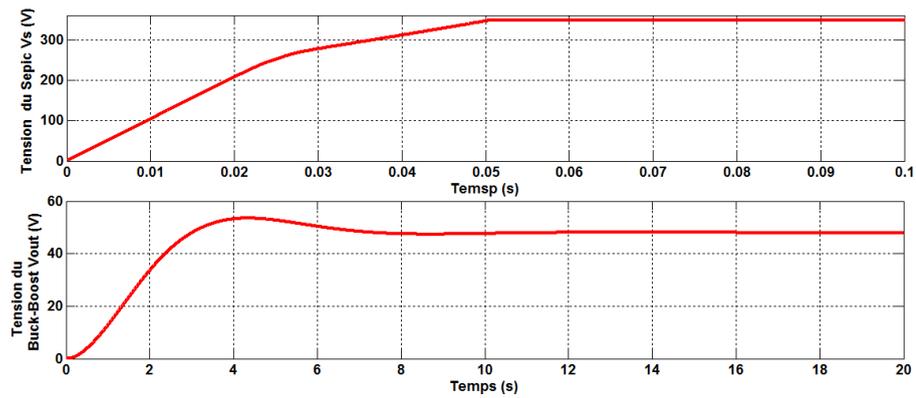


FIGURE 4.22 – Tension de sortie de Sepic et de Buck-Boost

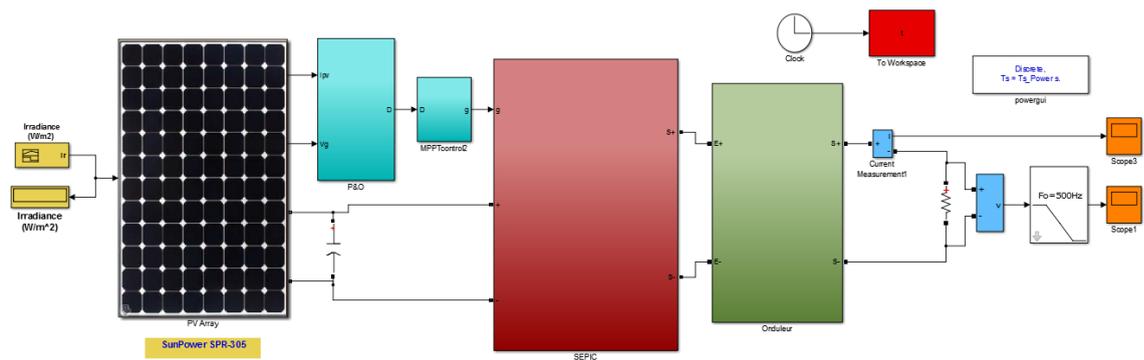


FIGURE 4.23 – Système PV avec onduleur

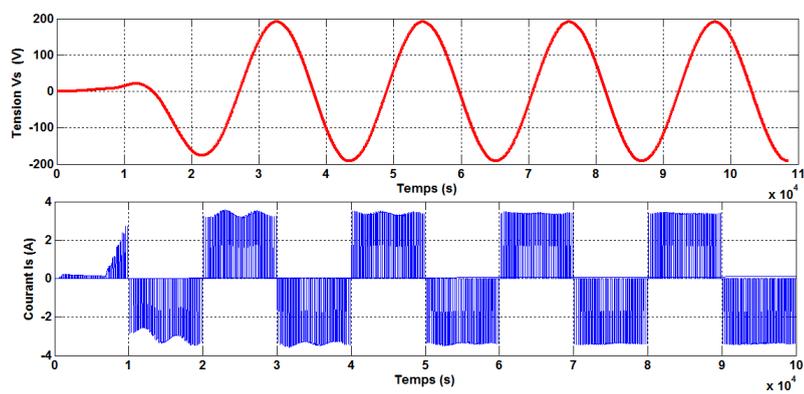


FIGURE 4.24 – Paramètres de sortie de l'onduleurs

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire traite de la modélisation et de l'optimisation d'un générateur photovoltaïque fonctionnant avec un convertisseur SEPIC pour l'alimentation d'une charge suivant un cahier de charge. Ce convertisseur présente l'avantage d'être un élévateur et abaisseur de tension ce qui permet à ce système de s'adapter aux changements météorologiques et pour extraire le maximum de puissance disponible.

En début et en fin de journée, lorsque la tension du panneau solaire est inférieure à la tension de la batterie, le convertisseur SEPIC, permet de récupérer un peu d'énergie supplémentaire pour assurer la recharge de la batterie.

L'étude de la technologie photovoltaïque au début de notre travail, nous a permis de bien comprendre le fonctionnement de la cellule photovoltaïque et l'application des modules photovoltaïques dans la production de l'électricité.

De même, l'étude théorique des différents convertisseurs DC/DC nous a bien permis de faire un bon dimensionnement du convertisseur SEPIC et de comprendre son fonctionnement ainsi que la détermination de ses paramètres.

En utilisant un modèle de panneau solaire SunPower 305 détaillé sur MATLAB nous a permis de représenter les principales caractéristiques du panneau PV ainsi de déterminer les caractéristiques I-V et P-V du panneau. Ce modèle a été validé en comparant les résultats de simulation avec les mesures.

La simulation du système a été effectuée en détails et en plusieurs étapes pour bien illustrer le fonctionnement du générateur photovoltaïque et son comportement face à la charge avec ou sans stockage.

Les résultats de la simulation ont démontré l'intérêt d'un dispositif de recherche de la puissance maximale. La méthode PO (perturbation and observation) a été choisie pour implanter un algorithme de poursuite du point de fonctionnement à puissance maximale du panneau PV (MPPT).

Les résultats expérimentaux obtenus démontrent l'efficacité du convertisseur SEPIC et de l'algorithme de poursuite du point de fonctionnement à puissance maximale dans l'optimisation de la performance du système PV étudié.

Néanmoins les résultats de ce modeste travail constituent les bases d'un travail à poursuivre et à améliorer pour une étude beaucoup plus approfondie qui pourra faire l'objet d'une thèse de doctorat. Ainsi, les perspectives futures sont dans un premier temps la réalisation pratique et la localisation précise de probables lieux d'implantation susceptibles de donner l'énergie optimale de la ressource PV en cette région.

Ceci constituera une évaluation régionale du potentiel photovoltaïque, permettant une intégration dans le réseau a fin d'améliorer la qualité de l'énergie et optimiser le rendement des futurs sites.

Puis nous pouvons améliorer cette recherche par des études comparatives des différents modèles du MPPT, et d'autres pour l'intégration de protections et l'amélioration d la fiabilité .

Nous espérons avoir posé une pierre dans le domaine de l'énergie solaire dans le niveau local, ce qui donnera une impulsion à la recherche dans cet axe, en vue d'une prise de conscience de « l'après pétrole », du respect de l'environnement et du développement durable.

Bibliographie

- [1] <http://www.pvsyst.com/fr/software>.
- [2] M. Belkacem. *Etude et optimisation du transfert d'énergie électrique en conversion photovoltaïque par la recherche du point de puissance maximale (MPPT)*. Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Master académique, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen-Algérie, Faculté des Sciences, 2015.
- [3] N. Benhaddouche. *La Commande d'un Système Photovoltaïque d'un Satellite*. Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Master, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen-Algérie, Faculté de Technologie, 2013.
- [4] H. Bin. *Convertisseur continu-continu à rapport de transformation élevé pour applications pile à combustible*. Mémoire présentée en vue de obtenir le grade de docteur, l'institut national polytechnique de lorraine, Département de formation doctorale : Electronique Electrotechnique, 2009.
- [5] M. O. E. H. D. Betaouaf. *Commande robuste d'un système photovoltaïque a usage domestique*. Juin 2013.
- [6] M. Dahouénon. *Le manuel du Technicien Photovoltaïque*. PERACOD, 2011.
- [7] S. Djeriou. *Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone*. Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Magister, Université Ferhat Abbas, Sétif-Algérie, Faculté de Technologie, 2014.
- [8] E. Kechar and E. and I. Touaïbia. Influence des rayonnements solaires sur le rendement des panneaux photovoltaïques. *Revue des Energies Renouvelables*, 2015.
- [9] A. R. F. Hananou. *Etude et simulation d'un panneau solaire raccordé au réseau avec périphérique de stockage*. Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Master académique, Université Kasdi Merbah, Ouargla-Algérie, Faculté des Sciences Appliquées, 2012.
- [10] A. B. M. Addou. *Dimensionnement d'une installation photovoltaïque autonome pour l'alimentation d'une ferme*. Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Master, Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen-Algérie, Faculté de technologie, 2016.
- [11] H. Macbahi. *Correction de facteur de puissance dans un convertisseur à résonance par une méthode active*. Mémoire présenté Comme exigence par-

- tielle de la maîtrise en électronique industrielle, Université du Québec à Trois-Rivières, Québec-Canada, Faculté des Sciences et et de Génie, 1996.
- [12] M. Meddah, M. Bourahla, and N. Bouchetata. Synthèse des convertisseurs statiques dc/ac pour les systèmes photovoltaïques. *Revue des Energies Renouvelables*, 2011.
- [13] T. Mohamed. Application des onduleurs multi niveaux dans les systemes de chauffage par induction (analyse, modélisation et commande). juin 2012.
- [14] A. M. N. Aouchiche, M.S. Aït Cheikh. Poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque par les méthodes de l'incrémentation de conductance et la perturbation observation. *Revue des Energies Renouvelables*, 2013.
- [15] S. Naffouti. *Dimensionnement et commande dun hacheur parallèle alimenté par une source photovoltaïque*. Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme d'ingénieur, Université de Monastir , Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir, 07 2012.
- [16] J. Pallier. *Dimensionnement des composants pour convertisseur SEPIC*. Projet Polytech Clermont-Ferrand-France, 2013.
- [17] S.Abada. *Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur Sepic*. Mémoire présenté dans le cadre du programme de maîtrise en génie électrique pour l'obtention du grade de Maître es Sciences (M.Se.), Université l'Université Laval, Québec-Canada, Faculté des Sciences et et de Génie, 2011.
- [18] M. Touaref. *Etude et simulation d'un convertisseur AC/DC type BUCK (Abaisseur de tension)*. Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Master académique, Université Mohamed Khider, Biskra-Algérie, Faculté des Sciences et de la Technologie, 2014.
- [19] Y.Nettari. *Commandes robustes et intelligentes des convertisseurs DC-DC*. Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Magister, Université Ferhat Abbas, Sétif-Algérie, Faculté de Technologie, 2014.

Annexe A

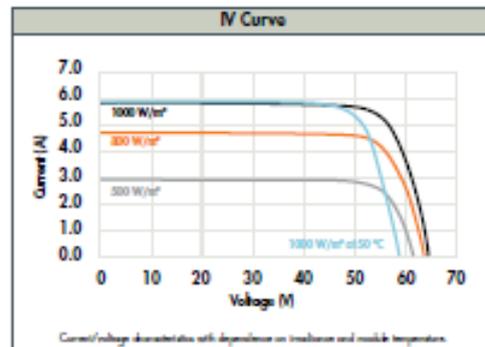
Caractéristiques du panneau SunPewer305

SUNPOWER

305 SOLAR PANEL

EXCEPTIONAL EFFICIENCY AND PERFORMANCE

Electrical Data		
Measured at Standard Test Conditions (STC) irradiance of 1000 W/m ² , air mass 1.5, and cell temperature 25°C		
Peak Power (+/-5%)	P _{max}	305 W
Rated Voltage	V _{mp}	54.7 V
Rated Current	I _{mp}	5.58 A
Open Circuit Voltage	V _{oc}	64.2 V
Short Circuit Current	I _{sc}	5.96 A
Maximum System Voltage	IEC, UL	1000 V, 600 V
Temperature Coefficients		
	Power	-0.38% / °C
	Voltage (V _{oc})	-176.6 mV/°C
	Current (I _{sc})	3.5 mA/°C
Series Fuse Rating		15 A
Peak Power per Unit Area		187 W/m ² , 17.4 W/ft ²
CEC FTC Rating		282.1 W



Mechanical Data	
Solar Cells	96 SunPower all-back contact monocrystalline
Front Glass	4.0 mm (5/32 in) tempered
Junction Box	IP-65 rated with 3 bypass diodes
Output Cables	900 mm length cables / Multi-Contact connector
Frame	Clear anodized aluminum alloy type 6063
Weight	24 kg, 53 lbs

Tested Operating Conditions	
Temperature	-40° C to +85° C (-40° F to +185° F)
Max. load	50 psf (2400 Pascals) front and back
Impact Resistance	Hail - 25mm (1 in) at 23 m/s (52 mph)

Warranty and Certifications	
Warranty	25 year limited power warranty 10 year limited product warranty
Certifications	IEC 61215, Safety tested IEC 61730; UL listed (UL 1703), Class C Fire Rating

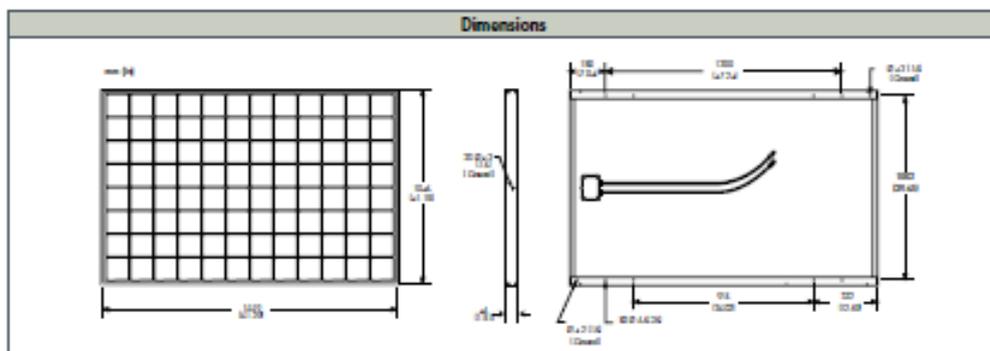


FIGURE 25 – Caractéristiques du panneau SunPewer305

Modèle de la batterie utilisé

The image shows a software interface for configuring a battery model. It features three tabs: 'Parameters' (selected), 'View Discharge Characteristics', and 'Battery Dynamics'. The 'Parameters' tab contains the following settings:

- Battery type:** A dropdown menu set to 'Lithium-Ion'.
- Nominal Voltage (V):** A text input field containing '48'.
- Rated Capacity (Ah):** A text input field containing '200'.
- Initial State-Of-Charge (%):** A text input field containing '80'.
- Use parameters based on Battery type and nominal values**
- Maximum Capacity (Ah):** A text input field (partially visible at the bottom).

FIGURE 26 – Modèle de la batterie utilisé

ETUDE ET DIMENSIONNEMENT D'UN CONVERTISSEUR SEPIC POUR UNE APPLICATION PHOTOVOLTAÏQUE

Résumé

Les convertisseurs électrique sont utilisés dans plusieurs domaines et jouent un rôle primordial dans les applications photovoltaïques. Ce mémoire met en oeuvre par simulation l'utilisation de l'énergie solaire extraite des panneaux photovoltaïques raccordé via un convertisseur SEPIC, ainsi qu'à un périphérique de stockage et une charge. Dans un premier temps, ce mémoire présente une étude sur la technologie photovoltaïque, puis de celle des convertisseurs DC-DC existants permettant d'alimenter la charge et charger les batteries. L'objectif est d'identifier les paramètres du SEPIC par un dimensionnement dans son ensemble le plus approprié à ce type d'application, en prenant en compte la technique du MPPT perturbation et observation. Enfin une conclusion générale, donne une synthèse des principaux résultats et résume l'apport de ce travail.

Mots clés

Convertisseur Sepic, Technologie photovoltaïque, Dimensionnement, MPPT, Énergie solaire, Simulation.

STUDY AND SIZING OF SEPIC CONVERTER FOR AN PHOTOVOLTAIC APPLICATION

Abstract

The power converters are used in many areas and play a key role in photovoltaic applications. This thesis implements simulation scheme using solar energy extracted by photovoltaic panels, which are connected through a SEPIC converter, a storage device and a load. In a first step, we present a study about photovoltaic technology. Then a study of different DC-DC converters which can supply the battery is completed. The objective is to identify the most appropriate device for this type of application. The Perturb and Observe MPPT method is also explained. Finally a general conclusion gives a summary of key solutions and summarizes the contributions of this work.

Keywords

Sepic converter, photovoltaic technology, sizing, MPPT, Solar energy, Simulation.