



وزارة البحث العلمي والتعليم العالي
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPEREUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem
كلية العلوم و التكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



N° d'ordre : M...../GE/2021

MEMOIRE

Présenté pour obtenir le diplôme de

MASTER EN GENIE ELECTRIQUE

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Par :

YAGOUB Nadjat

MESSALTI Ghaniya

Intitulé du sujet :

Etude et Régulation d'un Convertisseur Boost Elévateur DC-DC Appliqué au Système Photovoltaïque

Soutenu le / / 2022 devant le jury composé de :

Président :	BENDAHA Mourad	MAA	Université de Mostaganem
Examineur :	CHAUCHE Abdelah	MCA	Université de Mostaganem
Rapporteur :	BENYAMINA Mansour	MCA	Université de Mostaganem
Co-Rapporteur :	BENZIDANE Med Ridha		Université de Mostaganem

Année Universitaire 2021/2022

Remerciements

Louange à Allah pour tous les bienfaits qu'il a mis à notre disposition, c'est lui qui nous a donné les forces morales et physiques et nous a guidés dans le chemin de la science.

Grâce à dieu nous avons pu compléter notre formation par ce modeste travail de mémoire de fin d'études qui, nous l'espérons, sera bénéfique à d'autres étudiants.

Nous tenons à remercier vivement notre encadreur Mr Benyamina Mansour pour leur constante disponibilité à notre égard et pour leur précieuse aide, ce qui nous a permis de mener à bien ce travail.

Nous adressons toute notre gratitude aux membres du jury qui ont eu l'amabilité d'accepter de lire et de juger notre travail.

Nous remercions tous les enseignants de la Faculté des sciences et de la Technologie en général, et spécialement les enseignants du département de Génie Electrique qui ont contribué largement à notre formation. Nous remercions d'autre part l'ensemble des étudiants de notre faculté et surtout nos camarades de promotion, avec lesquels nous avons passé cinq merveilleuses années.

Nous remercions tous les enseignants qui nous ont fait profiter de leur Savoir, tout a long nos études, les personnels administratifs et tous ceux qui ont contribué et nous aide pour l'élaboration de ce travail.

A la fin, permettez-nous d'adresser nos sincères remerciements à tous nos amis, à nos proches et à toute personne qui nous a encouragé et cru en nous.

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Mes parents qui comptent le plus pour moi.

Mes très chers frères et sœurs.

A mon encadreur et mes professeurs qui m'ont bien entouré tout au long de mes études.

A mon binôme Yagoub Nadjjet qui ma supporter tous ces années.

A toutes mes amies et mes collègues d'études.

Messalti Ghaniya

Je dédie ce travail à :

Mes parents qui comptent le plus pour moi.

Mes très chers frères et sœurs.

A mon encadreur et mes professeurs qui m'ont bien entouré tout au long de mes études.

A mon binôme Messalti Ghaniya qui ma supporter tous ces années.

A toutes mes amies et mes collègues d'études.

Yagoub Nadjjet

Résumé

Durant ces dernières années, il y a eu un intérêt considérable pour les énergies renouvelables et plus particulièrement l'énergie photovoltaïque.

Ce projet porte sur la conception et la réalisation du convertisseur DC/DC de type Boost dans une chaîne Photovoltaïque commandé par la commande State flow destinée à régler la tension de sortie à une certaine valeur fixée par l'utilisateur.

L'efficacité du régulateur proposé est vérifiée par des résultats expérimentaux.

Mots clés : Photovoltaïque, Convertisseur BOOST, Commande State flow.

ملخص

في السنوات الأخيرة ، كان هناك اهتمام كبير بالطاقات المتجددة وخاصة الطاقة الكهروضوئية.

يتعلق هذا المشروع بتصميم وتحقيق محول DC / DC من نوع Boost في سلسلة كهروضوئية يتحكم فيها أمر تدفق الحالة الذي يهدف إلى تنظيم جهد الخرج إلى قيمة معينة يحددها المستخدم.

يتم التحقق من كفاءة المنظم المقترح من خلال النتائج التجريبية.

الكلمات المفتاحية: الطاقة الكهروضوئية ، محول BOOST ، التحكم في التدفق الحكومي.

Sommaire

Sommaire

	Liste des symboles et abréviations	I
	Introduction générale	2
<i>Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques</i>		
I.1	Introduction	5
I.2	Historique	5
I.3	Energie renouvelable	7
I.4	Les différents types d'énergies renouvelables	8
	I.4.1 L'énergie éolienne	8
	I.4.2 L'énergie hydraulique	9
	I.4.3 L'énergie géothermique	9
	I.4.4 L'énergie biomasse	10
	I.4.5 L'énergie biogaz	10
	I.4.6 L'énergie marémotrice	10
	I.4.7 L'énergie solaire	10
	I.4.7.1 L'énergie solaire thermique	11
	I.4.7.2 L'énergie solaire photovoltaïque	11
	I.4.7.3 L'énergie solaire thermodynamique	11
	I.5 Evaluation de l'énergie renouvelable en Algérie	12
	I.5.1 Potentiel solaire	12
	I.5.2 Potentiel éolien	13
	I.5.3 Les énergies géothermiques, issues de la biomasse et hydrauliques	14
I.6	Les avantages et les inconvénients de l'énergie renouvelable	14
	I.6.1 Les avantages	14
	I.6.2 Les inconvénients	16
I.7	Conclusion	16
<i>Chapitre II : Généralité sur le système photovoltaïque</i>		
II.1	Introduction	18
II.2	L'énergie solaire	18
II.3	Principe de la conversion photovoltaïque	18
II.4	Les cellules photovoltaïques	19
	II.4.1 Description de la cellule PV	19
	II.4.2 Principe de fonctionnement de la cellule PV	20
	II.4.3 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque	21
	II.4.3.1 Courant de court-circuit (I_{cc})	22
	II.4.3.2 Tension de circuit-ouvert (V_{co})	22
	II.4.3.3 Puissance de la cellule PV	23
	II.4.3.4 Puissance maximale d'une cellule PV	23
	II.4.3.5 Rendement énergétique	24
	II.4.3.6 Facteur de forme	25
II.5	Module PV	25
	II.5.1 Panneaux PV	25
	II.5.2 Générateur PV	26
II.6	Les différentes technologies	26

	II.6.1 Cellules cristallines	26
II.7	Les différents types de système PV	27
	II.7.1 Système photovoltaïque autonome	27
	II.7.2 Système photovoltaïque hybride autonome	28
	II.7.3 Système PV accordée aux réseaux	28
II.8	Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire	28
	II.8.1 Les avantages	28
	II.8.1 Les inconvénients	29
II.9	Conclusion	29
<i>Chapitre III : Hacheur destinée aux systèmes photovoltaïques</i>		
III.1	Introduction	31
III.2	Connexion directe générateur photovoltaïque-charge	31
	III.2.1 Connexion indirecte GPV-charge par le biais d'un étage d'adaptation	32
III.3	Les hacheurs (convertisseurs DC-DC)	33
	III.3. 1 Les types des convertisseurs de tension DC/DC	34
	III.3.1.1 Convertisseur BOOST	34
	III.3.1.2 Convertisseur BUCK	37
	III.3.1.3 Convertisseur BUCK-BOOST	38
	III.3.1.4 Convertisseur CUK	39
III.4	Récapitulatif d'analyse et choix du convertisseur	41
III.5	Avantages de convertisseur BOOST	42
III.6	Conclusion	42
<i>Chapitre IV : Simulation et évaluation des résultats</i>		
IV.1	Introduction	44
IV.2	La commande STATE FLOW	44
IV.3	Modélisation et simulation du convertisseur BOOST	45
	IV.3.1 Modélisation du convertisseur BOOST	45
	IV.3.2 Calcul des paramètres du convertisseur BOOST	45
	IV.3.2 Calcul des paramètres du convertisseur BOOST	45
	IV.3.3 Simulation du convertisseur BOOST	46
	IV.3.3 Les résultats de simulation	47
	IV.3.4 Choix du pas de simulation	50
IV.4	Simulation du convertisseur BOOST avec les différents pas	53
	IV.4.1 Résultats de la simulation du modèle globale	53
IV.5	Conclusion	57
	Conclusion générale	59

Symboles et abréviations

DC-DC : direct current- direct current.

PV : photovoltaïque.

GPV : générateur photovoltaïque

MOSFET : Métal Oxide Field Effect Transistors.

IGBTS : Insulated Gate Bipolar Transistors.

PM : puissance maximale.

FF : Facteur de forme.

D : diode de roue libre.

T_c : Température de la cellule.

R_p : Résistances parallèle shunt.

P_m : La puissance maximale produite (PV).

V_m : Tension qui correspond à la puissance maximale.

I_m : Courant qui correspond à la puissance maximale.

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

I_{ph} : Photo-courant (A).

R_s : Résistance série (Ω).

R_{sh} : Résistance shunt (ou parallèle) (Ω).

V_{co} : Tension en circuit ouvert.

K : Constante de Boltzmann.

T : Température effective de la cellule [Kelvin].

I₀ : courant de saturation.

P₀ : Puissance incident.

V_s : la tension de sortie.

V_e : la tension d'entrée.

α : Rapport cyclique.

Δi_L : L'ondulation du courant dans l'inductance.

Introduction générale

Introduction Générale

Ces dernières années La production et la demande énergétique mondiale de source fossile est un défi de grande importance pour répondre à l'accroissement de la population et à la hausse du niveau de confort de nos sociétés modernes et la demande les niveaux d'énergie dans les sociétés industrialisées continuent d'augmenter. Les sources d'énergie fossiles (Pétrole, gaz, charbon et l'uranium...). D'autre part, La consommation élevés de ces sources non renouvelables donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution et effrayants réduit les réserves de ce type d'énergie pour les générations future [1].

Aujourd'hui, la science s'est intéressée aux nouvelles sources d'énergies, appelées énergies renouvelables, Le secteur de ces dernières est le seul qui se distingue par sa capacité à réduire les émissions de gaz à effet de serre, la pollution et à exploiter des sources de plus en plus facilement, décentralisées l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, la géothermie, la biomasse et l'énergie solaire photovoltaïque, cette dernière sera étudiée dans ce mémoire [1].

La production énergie sur la base de l'énergie solaire photovoltaïque est propre et silencieuse, Gratuit et disponible dans la plupart des régions du monde. Elle été développée à un échelle plantaire de plus de centaines de gigawatts et pourrait devenir la principale source d'électricité à l'avenir [1].

La tension délivrée par les panneaux d'un système PV est continue et de faible amplitude. Pour l'élever à une valeur supérieure on utilise un convertisseur appelé hacheur de type élévateur ou BOOST. En général, le convertisseur BOOST est le moyen le plus simple d'augmenter la tension d'une alimentation DC [2].

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques continu-continu, permettant de générer une source de tension continue variable à partir d'une source de tension continue fixe. Ils se composent de condensateurs, d'inductance et d'interrupteurs statiques. Ils consomment moins de puissance, raison pour laquelle les hacheurs ont de très bons rendements [2].

Ce travail de mémoire est dédié à l'étude et à la simulation d'un convertisseur DC-DC de type BOOST avec l'utilisation d'une commande STATE FLOW pour la régulation. La démarche

adoptée pour la conduite de ce travail ainsi que les travaux de simulations seront présentés dans les quatre chapitres ainsi qu'une introduction et une conclusion est organisée.

Dans le premier chapitre, après avoir présenté les énergies renouvelables en générales, et les différents types d'énergie existantes dans la nature, ainsi que ses avantages et ses inconvénients.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons une généralité sur système PV, et le Principe de la conversion photovoltaïque constituées par des cellules photovoltaïques, ainsi que le module PV et les différentes technologies existantes, puis une représentation des différents types de système PV est donnée à fin de présenter les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation d'un système GPV, et les éléments constitutifs de le hacheur, puis une étude est faite sur les différents types de convertisseurs DC/DC, ainsi que récapitulatif d'analyse et choix , puis nous donnerons les Avantages du convertisseur BOOST .

Au dernier chapitre, on présente les résultats de simulation et la régulation du convertisseur BOOST avec system PV sous MATLAB-SIMULINK.

Ce travail s'achèvera par une conclusion générale, et une bibliographie de chaque chapitre qui regroupe l'ensemble des documents consultés au cours du travail réalisé.

Chapitre I

Les énergies renouvelables

1.1. Introduction

L'énergie est renouvelable si la consommation ne limite pas son utilisation future. C'est le cas de l'énergie solaire, de l'énergie éolienne, des voies navigables, de la terre et généralement de la biomasse humide ou de la biomasse sèche, dans la limite de la durée de vie humaine. Ce n'est pas le cas avec les combustibles fossiles et les combustibles nucléaires. Il est clair que la dynamique énergétique du 21^e siècle réunira de nouveaux acteurs du secteur des énergies renouvelables pour assurer un développement durable. Parmi les systèmes utilisant les énergies renouvelables, les systèmes d'énergie solaire utilisant l'énergie solaire et les systèmes d'énergie éolienne utilisant l'énergie éolienne sont mentionnés. Plusieurs technologies pour les systèmes d'énergie solaire et éolienne sont possibles, mais les plus intéressantes sont le solaire photovoltaïque et l'éolien à axe horizontal [3].

Ce chapitre présente d'une manière générale les énergies renouvelables (éolienne, géothermique, biomasse, hydraulique, solaire), et les différents types d'énergie qui le constituent, ainsi ses avantages et ses inconvénients.

1.2. Histoire des énergies renouvelables

Pendant la plus grande partie de son histoire, l'humanité n'a disposé que d'énergies renouvelables pour couvrir ses besoins énergétiques. Au Paléolithique, les seules énergies disponibles étaient la force musculaire humaine et l'énergie de la biomasse utilisable grâce au feu ; mais de nombreux progrès ont permis d'utiliser ces énergies avec une efficacité grandissante (inventions d'outils de plus en plus performants). Le progrès le plus significatif a été l'invention de la traction animale, qui est survenue plus tard que la domestication des animaux. On estime que l'homme a commencé à atteler des bovins à des araires ou des véhicules à roues durant le IV^e millénaire av. J.-C. Ces techniques inventées dans l'ancien croissant fertile ou en Ukraine, ont par la suite connu un développement mondial. L'invention du voilier a été un progrès important pour le développement des échanges commerciaux dans le monde. Celle des moulins à eau et à vent a également apporté une énergie supplémentaire considérable. Fernand Braudel qualifie de « première révolution mécanique » l'introduction progressive, du XI^e siècle au XIII^e siècle, des moulins à eau et à vent : « ces « moteurs primaires » sont sans doute de modique puissance, de 2 à 5 hp pour une roue à eau, parfois cinq, au plus dix pour les ailes d'un moulin à vent. Mais dans une économie mal fournie en

énergie, ils représentent un surcroît de puissance considérable. Plus ancien, le moulin à eau a une importance bien supérieure à celle de l'éolienne. Il ne dépend pas des irrégularités du vent, mais de l'eau, en gros moins capricieuse. Il est plus largement diffusé, en raison de son ancienneté, de la multiplicité des fleuves et rivières, ... »À la fin du XVIII^e siècle, à la veille de la révolution industrielle, la quasi-totalité des besoins d'énergie de l'humanité était encore assurée par des énergies renouvelables. Dans un essai d'évaluation de la répartition des consommations par source d'énergie, Fernand Braudel estime à plus de 50 % la part de la traction animale, environ 25 % celle du bois, 10 à 15 % celle des moulins à eau, 5 % celle de la force humaine et un peu plus de 1 % celle du vent pour la marine marchande ; il renonce à chiffrer la part des moulins à vent, faute de données, tout en précisant : « les éoliennes, moins nombreuses que les roues hydrauliques, ne peuvent représenter que le quart ou le tiers de la puissance des eaux disciplinées » On peut donc, évaluer la part totale de l'énergie éolienne (voile + moulins à vent) entre 3 et 5 %. Il mentionne pour mémoire la batellerie fluviale, la marine de guerre, le charbon de bois et de terre. L'apparition de la machine à vapeur, puis du moteur Diesel, ont entraîné le déclin des moulins à eau et de l'énergie éolienne au XIX^e siècle ; les moulins à eau et à vent ont disparu, remplacés par les minoteries industrielles. L'énergie hydraulique a connu un nouvel âge d'or avec l'hydroélectricité, apparue en Suisse, Italie, France et États-Unis à la fin du XIX^e siècle. Au XIX^e siècle, François de Larderel met au point, en Italie, les techniques d'utilisation de la géothermie. Dans les années 1910, les premiers chauffe-eau solaires individuels apparaissent en Californie. En 1911, la première centrale géothermique est construite à Larderello.

Au milieu du XX^e siècle, l'énergie éolienne n'était plus utilisée que pour la navigation de plaisance et pour le pompage (agriculture, polders). Puis, les éoliennes sont réapparues, bénéficiant de techniques plus performantes issues de l'aviation ; leur développement a pris de l'ampleur à partir des années 1990. Le solaire thermique et le solaire photovoltaïque se développent au début des années 2000. Sous l'effet des progrès technologiques et des économies d'échelle liées aux volumes croissants installés, les filières de production d'énergie renouvelable, encore émergentes au début des années 2000, voient leurs coûts évoluer rapidement.

Depuis la fin du XX^e siècle, en réponse à un début de raréfaction du pétrole, aux impacts climatiques et sanitaires négatifs des énergies carbonées, ainsi qu'aux accidents nucléaires de

Tchernobyl et Fukushima et aux controverses sur le traitement des déchets du nucléaire, une réorientation mondiale vers les énergies renouvelables est constatée[4].

1.3. Energie renouvelable

Le développement et l'utilisation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. Dans 20 à 30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources d'énergie traditionnelles et l'utilisation accrue des sources d'énergie renouvelables. Naturellement décentralisées, il est intéressant de les valoriser sur le lieu de consommation, en les convertissant directement en chaleur ou en électricité selon les besoins. La production décentralisée d'électricité à partir de sources renouvelables offre aux consommateurs une plus grande sécurité d'approvisionnement dans le respect de l'environnement. Cependant, le caractère aléatoire de ces sources nous oblige à établir des règles de taille et d'utilisation de ces systèmes afin d'en tirer pleinement parti. La figure 1.1 montre la production mondiale d'électricité en 2005 et la figure 1.2 fait un zoom sur les énergies renouvelables [5].

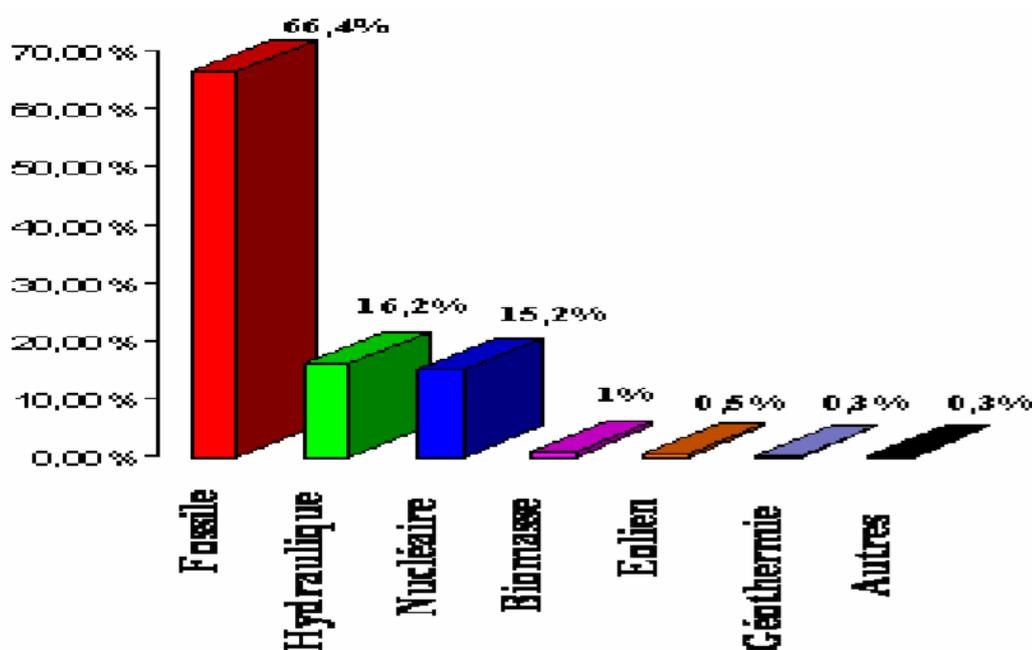


Figure 1.1 : Structure de la production d'électricité mondiale en 2005.

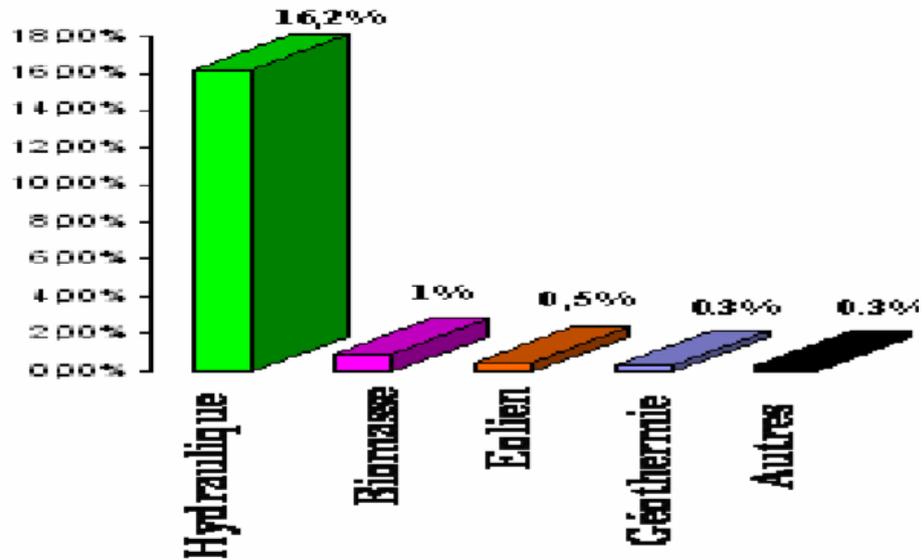


Figure 1.2 : Production d'électricité à partir de sources renouvelables en 2005.

1.4. Les différents types d'énergies renouvelables

Sept types parmi les énergies renouvelables les plus répondues sont considérés pour satisfaire le besoin énergétique du réseau électrique existant [6] :

- L'énergie éolienne.
- L'énergie hydraulique.
- L'énergie géothermique.
- L'énergie biomasse.
- L'énergie biogaz.
- L'énergie marémotrice.
- L'énergie solaire.

1.4.1. L'énergie éolienne

Les principes de l'énergie éolienne sont aussi vieux que les moulins à vent. En fait, le vent a longtemps été utilisé pour moulinier le blé et pomper l'eau. Au cours des dernières décennies, le système a été utilisé pour produire de l'électricité. En conséquence, il y a des milliers d'éoliennes en fonctionnement aujourd'hui. Il existe deux grands types d'éoliennes :

Éoliennes domestiques de faible puissance qui fournissent de l'électricité pour les besoins personnels et éoliennes de forte puissance connectées au réseau national.

Il existe plusieurs raisons pour lesquelles les pays du monde entier sont encouragés à passer à cette source d'énergie. Sur le plan économique, c'est une source d'énergie rentable, car le coût du kilowattheure (KWh) de l'énergie éolienne dans des endroits bien ventilés se rapproche de plus en plus de celui des combustibles fossiles. Les principaux facteurs qui déterminent la viabilité économique d'une éolienne sont les caractéristiques des pales, le rendement du générateur et surtout la vitesse moyenne du vent [10].

1.4.2. L'énergie hydraulique

L'hydraulique première des énergies renouvelables au monde, se distingue par sa souplesse d'utilisation, ses atouts écologiques et économiques.

Telle une roue ancestrale entraînée par un fleuve, les turbines d'une centrale hydroélectrique sont actionnées par la force de l'eau s'écoulant des niveaux supérieurs vers les niveaux inférieurs. Plus la hauteur de la cascade et du débit d'eau est grande, plus la production d'électricité est importante.

Il convient également de noter que dans le domaine de l'hydroélectricité, les ressources marémotrices et les ressources en courant océanique de la houle sont très importantes, et de nombreuses études internationales ont montré la faisabilité d'exploiter les ressources de la houle. La plus grande centrale marémotrice au monde est située en France (La Rance) avec une capacité de 240 MW.

Le développement attendu de l'énergie éolienne offshore pourrait être avantageusement couplé à une production par les vagues où l'on pourrait mettre en commun les coûteuses infrastructures de génie civil [3].

1.4.3. L'énergie géothermique

La géothermie désigne l'extraction de l'énergie contenue dans le sol sous forme de chaleur. La température du sous-sol augmente avec la profondeur, connue sous le nom de « gradient géothermique ». En moyenne, on gagne 3°C de plus par 100m. Ainsi, la température de l'eau dans la roche réservoir à 1500 m de profondeur peut atteindre 60-70°C. Le principe de la géothermie est de pomper cette eau chaude pour l'utiliser pour le chauffage, ou si elle est assez chaude pour produire de l'électricité [9].

1.4.4. L'énergie biomasse

Le terme biomasse désigne au sens large tous les êtres vivants. Ce concept a été appliqué aux produits végétaux biologiques à des fins énergétiques depuis le premier choc pétrolier.

Ainsi, la biomasse désigne l'ensemble des végétaux capables de récupérer leur énergie solaire stockée par diverses transformations, qui sont converties en différentes sources d'énergie, telles que :

- Chaleur et électricité

Cette énergie est générée à partir du bois et des déchets agricoles (paille), des déchets municipaux, des ordures ménagères et des déchets industriels du secteur agroalimentaire.

Ces déchets subissent une transformation thermochimique (combustion, pyrolyse, gazéification) pour générer principalement de la chaleur et de l'électricité.

- Biocarburant

Carburant bioéthanol : L'éthanol est produit à partir d'amidon et de glucose extraits de cultures sucrières (betteraves, canne à sucre) et de céréales (blé, maïs) par un processus de fermentation alcoolique.

Carburants bio gazole : Il comprend des plantes oléagineuses (colza, tournesol et soja) L'huile extraite de leurs graines permet de produire du biodiesel, qui peut remplacer le gazole actuellement utilisé dans les moteurs diesel [4].

1.4.5. L'énergie biogaz

Exploiter l'énergie de la collecte et de la combustion du gaz méthane produit par les déchets organiques dans les décharges agricoles et industrielles [6].

1.4.6. L'énergie marémotrice

Énergie des vagues (marée haute, marée basse), convertie en électricité [6].

1.4.7. L'énergie solaire

Le soleil est une source d'énergie presque inépuisable, envoyant un rayonnement à la surface de la Terre équivalent à environ 8 400 fois la consommation énergétique annuelle des humains. Cela correspond à une réception de puissance instantanée de 1 kilowatt crête par mètre carré (kW/m²) répartie sur tout le spectre de l'UV à l'IR. Les déserts de notre planète obtiennent plus d'énergie du soleil en 6 heures que les humains n'en utilisent en une année [4].

L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés:

1.4.7.1. L'énergie solaire thermique: Cela génère simplement de la chaleur à travers le panneau sombre. Nous pouvons également utiliser la chaleur du soleil pour générer de la vapeur, qui est ensuite convertie en électricité [4].

1.4.7.2. L'énergie solaire photovoltaïque: Celles-ci incluent l'utilisation de panneaux solaires pour générer de l'électricité directement à partir de la lumière. Cette forme d'énergie a été exploitée dans de nombreux pays, en particulier là où les sources d'énergie conventionnelles telles que les hydrocarbures ou le charbon ne sont pas disponibles [4].



Figure 1.3 : Module photovoltaïque.

1.4.7.3. L'énergie solaire thermodynamique : est une autre forme d'utilisation de l'énergie solaire qui implique l'utilisation directe de la lumière pour chauffer.

Il y a aussi ce qu'on appelle l'énergie solaire thermodynamique, qui fonctionne en focalisant les rayons du soleil à travers des miroirs incurvés dans un four placé sur une tour qui stocke les calories puis les restitue mécaniquement à l'aide d'une turbine à vapeur par exemple [6].

1.5. Evaluation de l'énergie renouvelable en Algérie

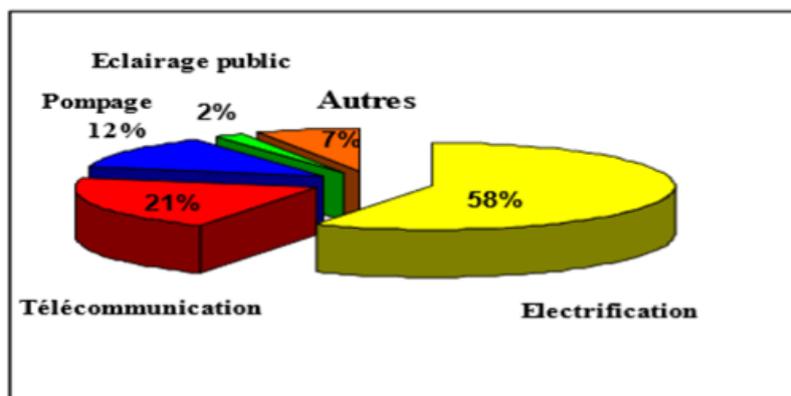


Figure 1.4 : Répartition des usages de la filière ER en Algérie.

Le potentiel d'énergies renouvelables de l'Algérie est le plus important d'Afrique du Nord. Le marché des énergies renouvelables a de larges perspectives et la promotion des énergies renouvelables est l'un des axes de la politique énergétique et environnementale nationale. Parmi les objectifs fixés par le gouvernement, le marché local doit atteindre 500 mégawatts en 2010, les énergies renouvelables générant 5 % du total [5].

Tableau 1.1 : La répartition de la puissance installée par application.

Application	Puissance installée (KW)	Pourcentage
Electrification	1353	58 %
Télécommunication	498	21 %
Pompage	288	12 %
Eclairage public	48	2 %
Autres	166	7 %

1.5.1. Potentiel solaire

De par sa situation stratégique, l'Algérie dispose des plus importantes ressources en énergie solaire du bassin méditerranéen. L'ensoleillement annuel moyen en Algérie dépasse les 2 000 heures et dans le désert du Sahara, il atteint près de 3 500 heures.

L'énergie totale reçue est estimée à 169 400 TWh/an, soit 5 000 fois la consommation électrique annuelle du pays [5].

Tableau 1.2 : Le Potentiel solaire en Algérie.

Régions	Région côtière	Hauts plateaux	Sahara
Durée moyenne d'ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m ² /an)	1700	1900	2650

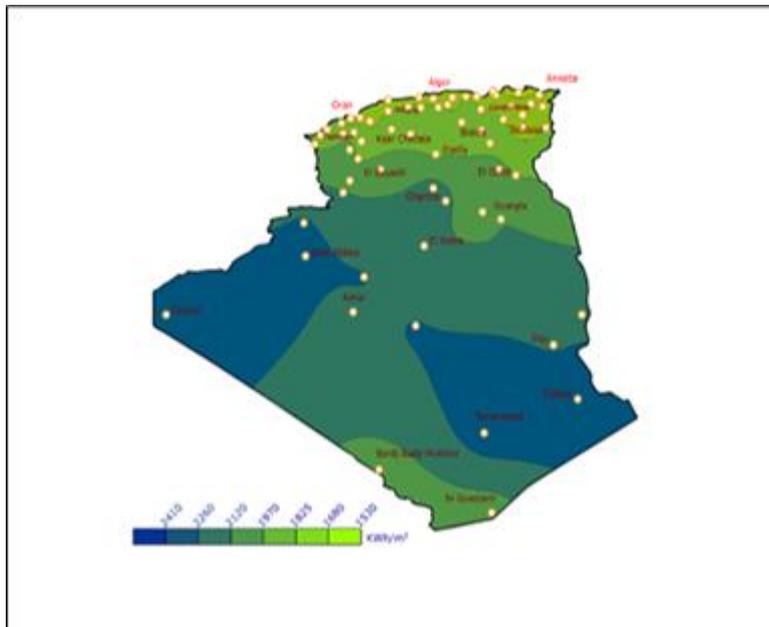


Figure 1.5 : Carte l'irradiation globale reçue dans une surface horizontale en Algérie.

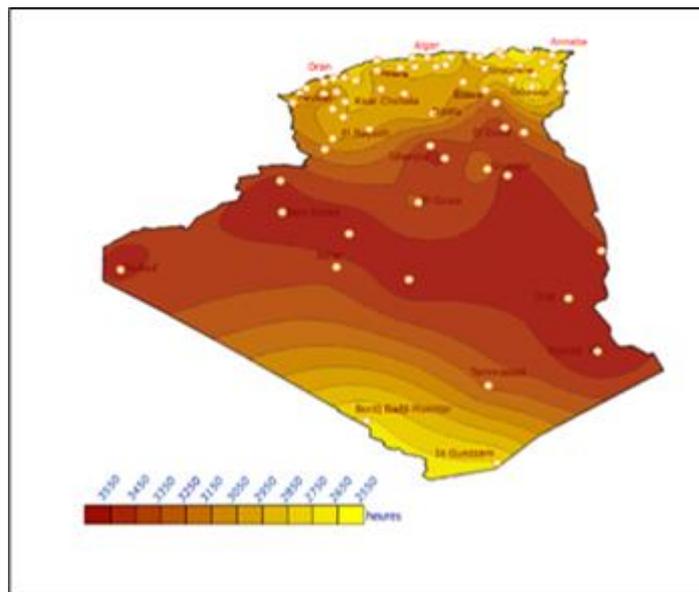


Figure 1.6 : Carte Durée moyenne d'ensoleillement en Algérie.

1.5.2. Potentiel éolien

Le potentiel éolien diverge selon la situation géographique. Ainsi au nord du pays, le potentiel éolien se caractérise par une vitesse moyenne des vents modérée (1 à 4 m/s) avec des microclimats autour d'Oran, Annaba, sur les hauts plateaux et à Biskra. Ce potentiel énergétique convient parfaitement pour le pompage de l'eau particulièrement sur les Hauts Plateaux. Au Sud, la vitesse moyenne des vents dépasse [5].

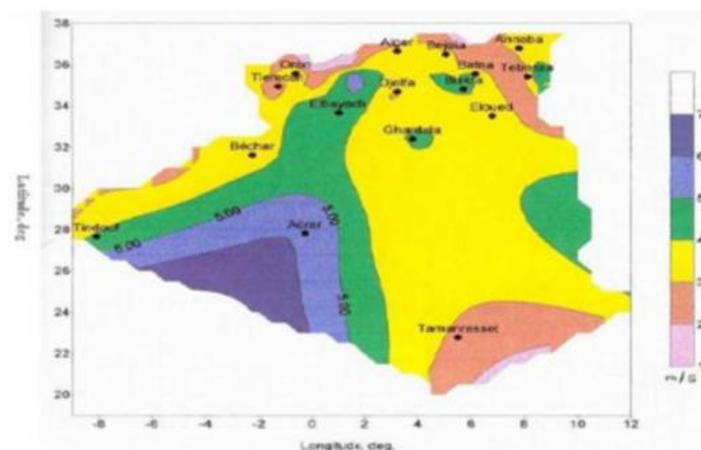


Figure 1.7 : Carte des vents en Algérie.

1.5.3. Les énergies géothermiques, issues de la biomasse et hydrauliques

Plus de 200 sources chaudes ont été répertoriées dans le nord-est et le nord-ouest de l'Algérie. Environ 33% d'entre eux sont au-dessus de 45°, avec le plus chaud à Biskra (118°). Plus au sud, avec Biskra au nord, Salah au sud et l'Adrar à l'ouest, la nappe d'Albia s'étend sur des milliers de kilomètres et a une température moyenne de l'eau de 57°. L'ensemble du débit opérationnel de l'eau de source et des aquifères est estimé à 700 MW/an. Le potentiel de biomasse se répartit entre les déchets d'activités humaines, les déchets municipaux et agricoles non valorisés, estimés à 1,33 MTEP/an (tonne équivalent pétrole) et l'énergie issue du bois de forêt. Ce dernier représente un potentiel récupérable de 37 MTEP/an et 3,7 MTEP/an. La part de l'hydraulique dans la production nationale d'électricité reste faible (1,7 % de la production électrique installée), en raison du nombre insuffisant de sites et du faible taux de développement des sites existants. [5].

1.6. Les avantages et les inconvénients de l'énergie renouvelable

De manière générale, les énergies renouvelables sont plus propres que les énergies fossiles et fissiles actuellement exploitées dans le monde entier. Elles sont plus écologiques, disponibles en masse autour du globe et sont « gratuites » une fois les installations de production rentabilisées [11].

Pour être plus précis, il faudrait se pencher sur les avantages et inconvénients que présente chaque source d'énergie renouvelable. En voici quelques exemples:

1.6.1. Les avantages

- ❖ **L'énergie éolienne** est l'énergie propre par excellence. Sans rejet ni déchet d'aucune sorte, elle permet avec un bon coefficient de performance d'assurer une bonne indépendance énergétique. Sur terre ou off-shore, les éoliennes démontrent d'excellentes capacités de production et sont une alternative viable pour les territoires les plus reculés dont l'accès à l'électricité est difficile.
- ❖ **L'énergie biomasse** est liée à la combustion du bois. Le bois est un combustible très présent, notamment en France où il est largement implanté. Si cette énergie rejette tout de même des gaz à effet de serre, les rejets sont moindres par rapport à la quantité de CO₂ qu'un arbre aura absorbé au cours de sa vie.

Une forêt bien gérée et renouvelée permet de ne pas épuiser les réserves en bois. La biomasse est donc une énergie qui participe au développement local tout en étant très bon marché (les bûches et les granulés de bois sont les combustibles les moins chers du marché).

❖ **L'énergie solaire** est largement plébiscitée dans le secteur énergétique et se développe à vitesse grand V. Production d'électricité grâce au photovoltaïque, mais aussi de chauffage grâce aux panneaux solaires thermiques, le solaire peut être exploité à grande échelle dans des parcs prévus à cet effet ou à petite échelle chez les particuliers.

1.6.2. Les inconvénients

Comme pour chaque chose, les énergies renouvelables ont également leurs petits défauts. On notera en priorité un coût relativement important à l'achat des installations dont la rentabilité peut se faire attendre des années. De plus, la plupart de ces énergies vertes sont sujettes aux caprices de Dame nature. En effet, des journées sans vent ou sans grande luminosité peuvent contrarier fortement la production de l'éolien et du solaire. Reprenons en détails les trois sources précédemment citées :

❖ **La production d'énergie de l'éolien** est très dépendante de la force du vent. Pour pallier cela, les éoliennes sont toujours placées dans des zones très venteuses. Cependant, certaines populations refusent leur implantation à cause des nuisances sonores et visuelles qu'elles entraîneraient.

❖ **L'énergie solaire** ne possède pas encore un rendement suffisant pour subvenir à la totalité des besoins énergétiques d'un foyer. Se pose également le problème du recyclage des cellules photovoltaïques et thermiques [11].

1.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté un rappel sur quelques notions d'énergies renouvelables (éolienne, géothermique, biomasse, hydraulique, solaire...), parmi toutes ces énergies renouvelables nous avons adopté l'énergie solaire pour alimenter notre convertisseur de type DC/DC, et en considérant que l'énergie solaire est l'énergie de future, le chapitre 2 fera l'objet sur une étude détaillée sur les systèmes photovoltaïques.

Références Bibliographiques

- [1] B. Samiha, B. Malika, « Optimisation énergétique de chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque », mémoire de master. Université Mohamed Boudiaf de Mesila, 2021.
- [2] B. Mohamed samir, A. Salah eddine, « Etude d'un convertisseur boost pour système photovoltaïque », mémoire de master. Higher school in sciences de Tlemcen, 2020.
- [3] Z. Nourredine, « Étude et Dimensionnement des Systèmes de Production d'Énergies Renouvelables », Thèse de Magister, 2014, Université Ferhat Abbas de Setif1.
- [4] S. Hamza, « Modélisation Et Commande Des Convertisseurs DC-DC Utilisés Dans Les Systèmes Photovoltaïques (Théorie et Expérimentation) », Thèse de Doctorat de L'université de Batna 2, Décembre 2016.
- [5] B. Soltane, « Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables », Thèse de Doctorat de L'université de Constantine, Juin 2010.
- [6] S. Hamza, Cours «Energies Renouvelables, 2017». <https://www..univ-chlef.dz>
- [7] Wikipedia, « https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_renouvelable »
- [8] S. Haddi, «Contribution à l'optimisation de l'insertion des énergies renouvelables dans un réseau électrique intelligent (Smart Grid) », Thèse de Doctorat de L'université Ferhat Abbas de Setif1, Novembre 2019.
- [9] O. Amna, « Analyse de la transition vers les énergies renouvelables en Tunisie : Risques, enjeux et stratégies à adopter », Thèse de Doctorat de L'Université De Sfax, Septembre 2016.
- [10] <https://www.vattenfall.fr/le-mag-energie/avantages-inconvenients-des-energies-renouvelables>.

Chapitre II

Généralité sur le système photovoltaïque

2.1. Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'énergie récupérée de la lumière du soleil grâce à des panneaux photovoltaïques et convertie directement en électricité. C'est le résultat de la conversion directe des photons en électrons dans un semi-conducteur. L'énergie solaire photovoltaïque est une source d'énergie non polluante qui peut être utilisée en grande quantité sur toute la surface de la Terre, et bien que significativement atténuée lorsqu'elle traverse l'atmosphère, une quantité considérable reste lorsqu'elle atteint le sol. On peut donc s'attendre à des pointes de 1000W/m^2 en zone tempérée et 1400W/m^2 lorsque l'atmosphère est peu polluée [1].

2.2. L'énergie solaire

L'énergie solaire photovoltaïque fait référence à l'énergie électrique générée par la conversion d'une partie du rayonnement solaire à l'aide de cellules photovoltaïques.

Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 40 ans. Les applications ont commencé avec des programmes spatiaux pour les transmissions radio à partir de satellites. Ils continuent d'utiliser des balises et des dispositifs marins dans des endroits isolés du monde entier, utilisant des batteries pour stocker l'électricité pendant des heures sans soleil [1].

2.3. Principe de la conversion photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont basées sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque, qui consiste à créer une force électromotrice lorsque la surface de la cellule est exposée à la lumière. La tension résultante peut varier entre 0,3 et 0,7 V, selon les matériaux utilisés et leur disposition, ainsi que la température de la cellule. La figure 2.1 montre une cellule photovoltaïque typique.

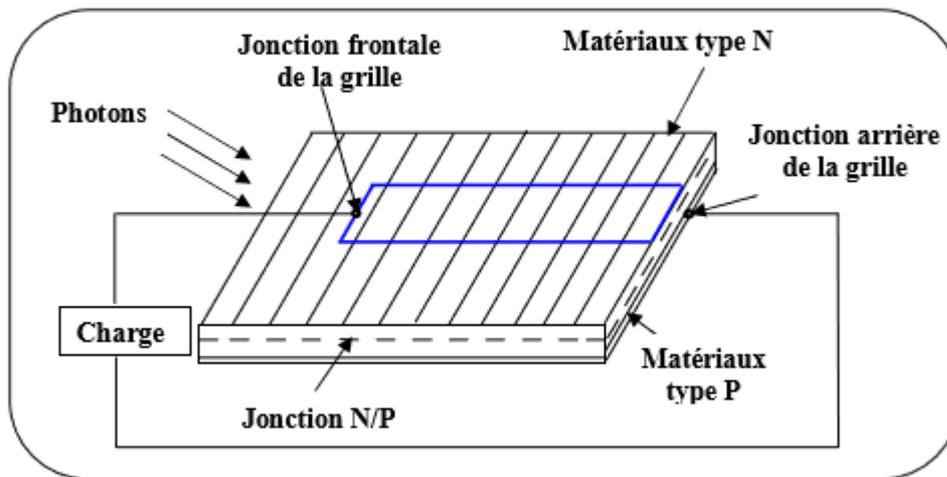


Figure 2.1 : Principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par cellule photovoltaïque.

Les cellules PV sont constituées de deux couches de silicium, l'une est dopée P (dopée au bore) et l'autre est dopée N (dopée au phosphore), créant une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transfèrent de l'énergie aux atomes de la jonction PN de sorte que les électrons (charge N) et les trous (charge P) créent une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel peut être mesurée entre les connexions des bornes positive et négative de la batterie. La tension maximale de la batterie à courant nul est d'environ 0,6 V, et cette tension est appelée tension de circuit ouvert VOC. Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées ; il est appelé courant de court-circuit ISC et dépend fortement du niveau d'éclairage.

2.4. Les cellules photovoltaïques

2.4.1. Description de la cellule PV

C'est l'élément de base qui grâce à lui la conservation est faite par l'assemblage de plusieurs cellules, on peut atteindre la puissance que l'on veut. Les photopiles ou cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité. Elles sont réalisées à l'aide des matériaux semi-conducteurs ayant des propriétés intermédiaires entre conducteurs et isolants [3].

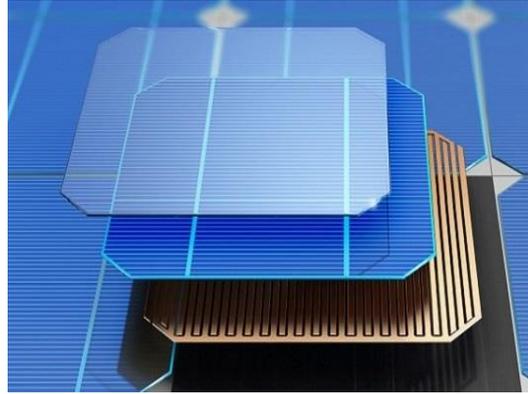


Figure 2.2 : Description d'une cellule.

2.4.2. Principe de fonctionnement de la cellule PV

Le fonctionnement des cellules photovoltaïques repose sur les propriétés des semi-conducteurs, qui initient le flux d'électrons lorsqu'ils sont frappés par des photons. Les photons sont des particules élémentaires qui transportent l'énergie solaire à 300 000 km/s, et Albert Einstein les appelait « particules de lumière » dans les années 1920. Lorsqu'ils frappent des éléments semi-conducteurs comme le silicium, ils arrachent des électrons à leurs atomes. Ces électrons commencent à se déplacer de façon désordonnée, à la recherche d'autres "trous" pour se réorienter.

Mais pour générer du courant, ces électrons doivent tous se déplacer dans la même direction. Pour les aider, nous allons combiner deux types de silicium. Le côté exposé au soleil est "dopé" avec des atomes de phosphore, qui ont plus d'électrons que le silicium, et l'autre côté est dopé avec des atomes de bore, qui ont moins d'électrons. Cette double face devient une sorte de pile : la face avec le plus d'électrons devient l'électrode négative (N), et la face avec le moins d'électrons devient l'électrode positive (P). Un champ électrique est créé entre les deux [3].

Lorsque les photons excitent des électrons, ces électrons vont migrer vers la région N en raison du champ électrique, tandis que les "trous" vont se déplacer vers la région P. Ils retournent vers le circuit externe sous forme d'énergie électrique par des contacts électriques déposés sur les surfaces des deux régions avant d. générer du courant continu. Les couches anti-reflets empêchent la perte de photons en excès par réflexion sur les surfaces, voir Figure 2.3.

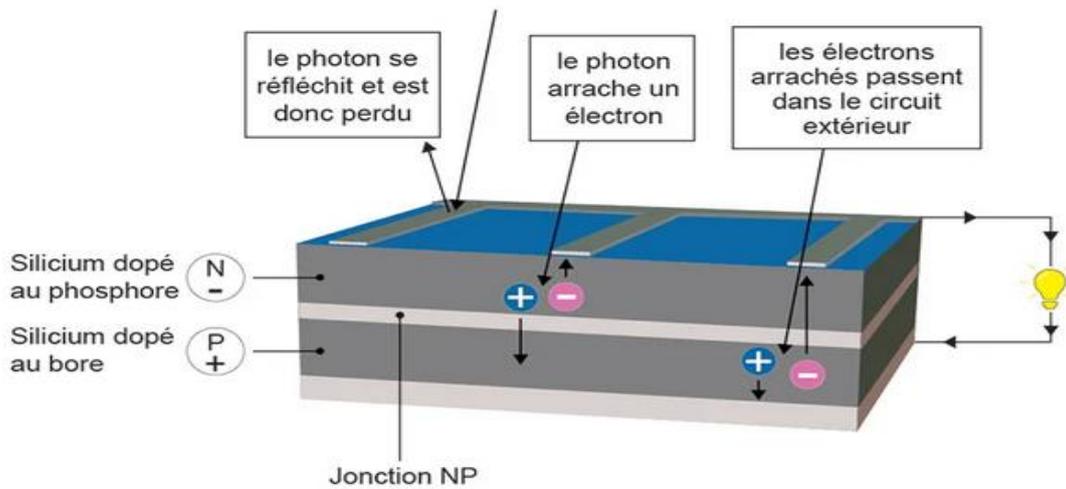


Figure 2.3 : Principe de fonctionnement de la cellule PV.

2.4.3. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

Les performances de la cellule solaire sont représentées à travers la caractéristique courant-tension I-V. Cette dernière apporte une lecture claire des paramètres caractérisant la cellule solaire comme le rendement de la cellule, les différents types des résistances parasites et le facteur de forme. Le courant est mesuré en fonction de la tension appliquée sous obscurité et sous ensoleillement, la lumière permet de décaler la courbe I-V vers le bas dans le quatrième quadrant, car le courant photoélectrique provoque la production de l'énergie [5].

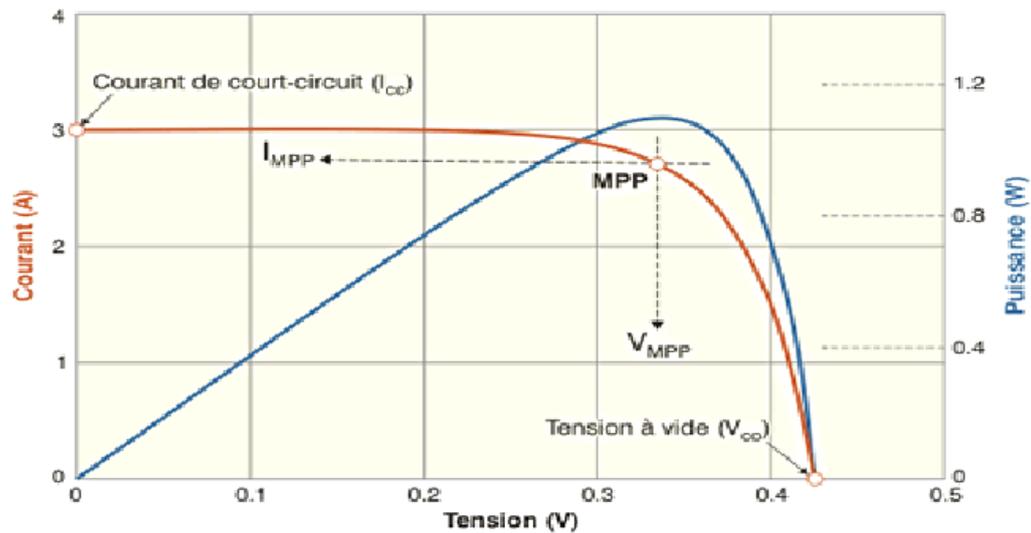


Figure 2.4 : Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque.

2.4.3.1. Courant de court-circuit (I_{cc})

Il s'agit du courant qui traverse la cellule photovoltaïque lorsque celle-ci est court-circuit, c'est-à-dire lorsque le pôle + est relié au pôle - (la tension à ses bornes est alors nulle). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule $P = V \times I$ est nulle [5].

$$I_{cc} = \frac{I_{cc}}{\left[1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right]} \quad (2.1)$$

I_{ph} : Photo-courant [A], proportionnel à l'irradiance F, avec correction selon T.

R_s : Résistance série [Ω].

R_{sh} : Résistance shunt (ou parallèle) [Ω].

2.4.3.2. Tension de circuit-ouvert (V_{co})

Il s'agit de la tension aux bornes de la cellule lorsque celle-ci est en circuit ouvert, c'est-à-dire lorsque le pôle + et le pôle - sont isolés électriquement de tout autre circuit électrique (le courant la traversant est alors nul). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule $P = V \times I$ est nulle.

Dans le cas idéal, elle est déterminée à partir de l'équation de la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque par l'expression [5]:

$$V_{co} = \frac{k * T}{q} \left[\ln \frac{I_{cc}}{I_0} + 1 \right] \quad (2.2)$$

Avec :

q : Charge de l'électron = 1,602. 10⁻¹⁹ [Coulomb].

k : Constante de Boltzmann = 1,38. 10⁻²³ [J/K].

T : Température effective de la cellule [Kelvin].

I₀ : Courant de saturation [A].

2.4.3.3. Puissance de la cellule PV

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixes (éclairage, température, vitesse de circulation de l'air ambiant, etc...), la puissance électrique P(W) disponible aux bornes d'une cellule PV est [5]:

$$P = VI \quad (2.3)$$

P : Puissance fournie par la cellule PV [W].

V : Tension mesurée aux bornes de la cellule PV [V].

I : Intensité débitée par la cellule PV [A].

2.4.3.4. Puissance maximale d'une cellule PV

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximale P_{max} correspondrait donc à la tension de circuit ouvert V_{co} multipliée par le courant de court-circuit I_{cc} [5] :

$$P_{max} = V_{co} I_{cc} \quad (2.4)$$

P_{max} : La puissance fournie par la cellule PV [W].

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

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

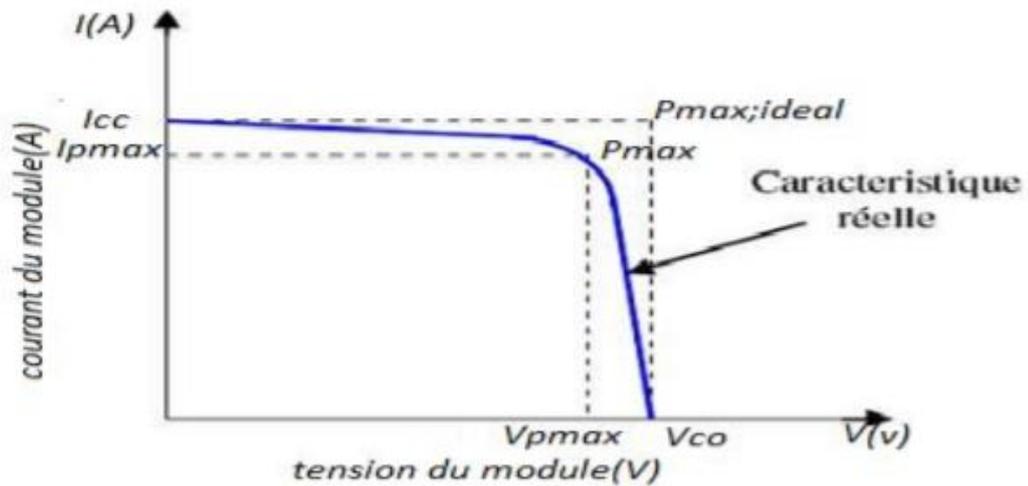


Figure 2.5 : Puissance maximale idéale et pratique.

En pratique, la courbe caractéristique des cellules photovoltaïques est plus "arrondie", comme le montre la figure 2.5, la tension au point de puissance maximale $V_{P_{max}}$ est inférieure à la tension en circuit ouvert V_{co} , et à la même tension, le courant fourni $I_{P_{max}}$ est inférieur, et le courant de court-circuit I_{cc} est plus faible. L'expression de la puissance à ce moment est [5] :

$$P_{max} = V_{P_{max}} I_{P_{max}} \quad (2.5)$$

2.4.3.5. Rendement énergétique

Le rendement de conversion est défini comme le rapport entre la puissance maximale produite par la cellule PV et la puissance du rayonnement solaire incident :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_0} \quad (2.6)$$

Avec :

P_0 : Puissance incident

2.4.3.6. Facteur de forme

On appelle facteur de forme FF, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage, le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule P_{\max} (I_{\max} , V_{\max}) et le produit du courant de court-circuit I_{cc} par la tension de circuit-ouvert V_{co} (c'est-à-dire la puissance maximale d'une cellule idéale). Le facteur de forme indique la qualité de la cellule ; plus il s'approche de l'unité plus la cellule est performante, Il est de l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes ; et diminue avec la température. Il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites R_s et R_{sh} . Il est défini par [5]:

$$FF = \frac{P_{\max}}{I_{cc} V_{co}} = \frac{I_{\max} V_{\max}}{I_{cc} V_{co}} \quad (2.7)$$

2.5. Module PV

Les cellules photovoltaïques basiques constituent des générateurs de très faible puissance pour les besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule de base de plusieurs dizaines de centimètres carrés peut fournir jusqu'à plusieurs watts de puissance à moins d'un volt (tension de jonction PN). Pour générer plus de puissance, plusieurs batteries doivent être connectées ensemble pour créer un module. Connecter des cellules en série peut facilement augmenter la tension globale, tandis que les connecter en parallèle augmente le courant. Les cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans du polymère EVA (éthylène acétate de vinyle) et sur la face avant un verre à haute transmission et bonne résistance mécanique, sur la face arrière du polyéthylène ou voir Figure 2.6 [3].

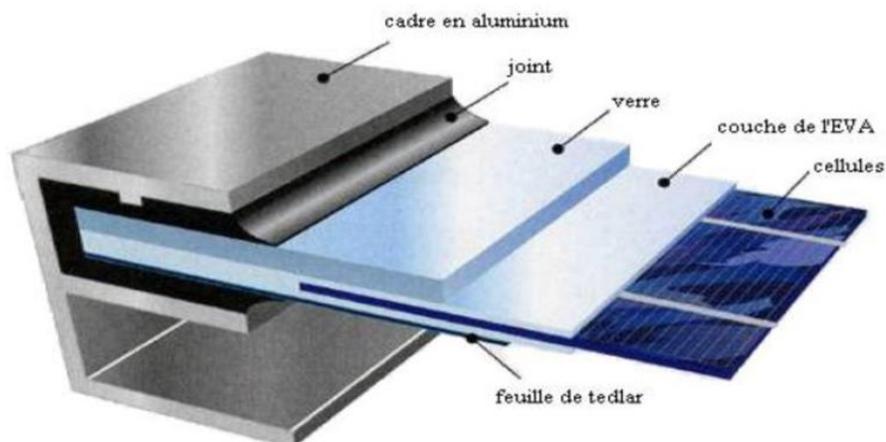


Figure 2.6 : Composition d'un module solaire photovoltaïque.

2.5.1. Panneaux PV

Pour obtenir une puissance de quelques KW à plusieurs MW, à la bonne tension, les modules doivent être combinés en série (augmentant la tension) et en parallèle (augmentant le courant) dans un panneau. La quantité d'électricité dans l'ensemble des composants du panneau PV dépend [3]:

- Des besoins en électricité.
- De la taille du panneau.
- De l'ensoleillement du lieu d'utilisation.
- De la saison d'utilisation.

2.5.2. Générateur PV

Les générateurs photovoltaïques sont constitués de modules interconnectés qui forment une unité, produisant une puissance continue élevée compatible avec les équipements électriques courants. Les modules photovoltaïques sont généralement connectés en série et en parallèle pour augmenter la tension et le courant de sortie du générateur. Les modules interconnectés sont montés sur des supports métalliques et inclinés à l'angle souhaité en fonction de l'emplacement, ce groupe est souvent appelé champ de module [4].

2.6. Les différentes technologies

Les performances des cellules photovoltaïques sont largement déterminées par les matériaux constitutifs, et la plupart des recherches se sont concentrées sur ce domaine car c'est l'élément qui a jusqu'à présent entravé la production photovoltaïque et sa diffusion à grande échelle. La technologie des cellules solaires s'est développée de manière très diverse. Une distinction est souvent faite entre les cellules cristallines et les cellules à couches minces [3].

2.6.1. Cellules cristallines

Les cellules en silicium mono et poly-cristallin représentent environ 94% du marché.

2.7. Les différents types de système PV

En général, un système photovoltaïque consiste en un ensemble de différents sous-systèmes interdépendants qui représentent un processus énergétique complexe. C'est-à-dire des structures de support rigides pour les composants du champ PV, fixes ou mobiles, le câblage, les boîtes de jonction, les éléments de protection, les batteries nécessitant un stockage d'énergie et leurs régulateurs, les convertisseurs DC/DC (hacheurs) et convertisseur AC/DC (onduleur) dans la plupart des cas une installation photovoltaïque ne contient aucune pièce mobile. Ils sont fiables, nécessitent peu d'entretien, sont silencieux, ne produisent aucune émission polluante et sont des systèmes modulaires. Il existe plusieurs types de systèmes photovoltaïques [6].

2.7.1. Système photovoltaïque autonome

Le système fournit de l'électricité aux zones hors réseau. Il a plusieurs domaines d'application, tels que les pompes à eau, les stations industrielles assurant la protection, les systèmes de surveillance et de comptage. Il est largement utilisé dans les stations spatiales et les relais de communication. L'énergie électrique générée par ce système est utilisée directement ou stockée dans des batteries, comme le montre la figure 2.7 [6].

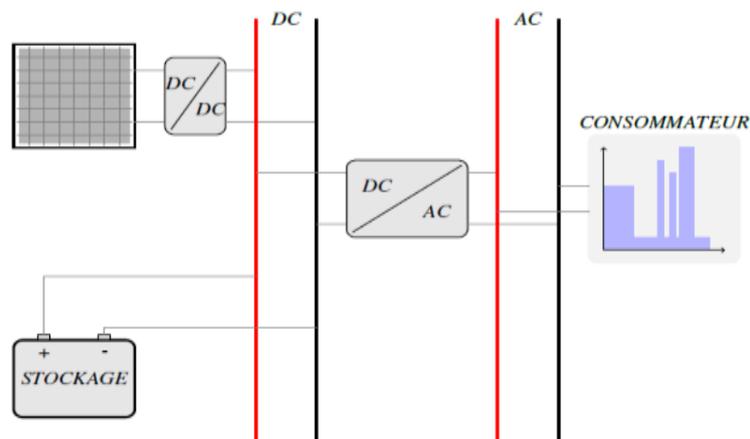


Figure 2.7 : Exemple d'installation photovoltaïque autonome.

2.7.2. Système photovoltaïque hybride autonome

Les systèmes hybrides sont constitués de générateurs photovoltaïques avec une ou plusieurs sources d'énergie renouvelables ou générateurs ou une combinaison des deux. Comme le montre la figure 2.8, ces systèmes peuvent avoir des batteries qui peuvent également être chargées à partir d'autres sources [6].

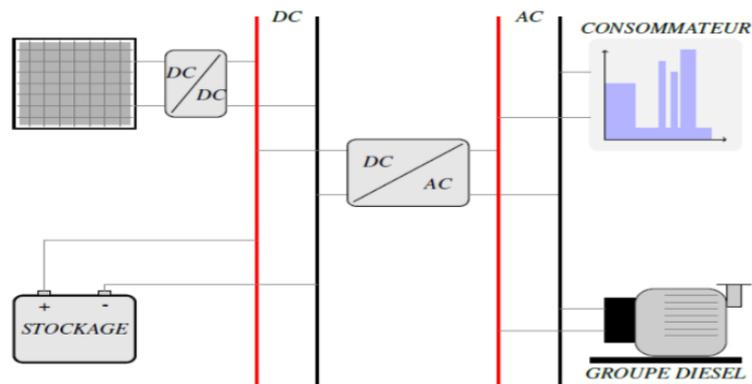


Figure 2.8 : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque hybride.

2.7.3. Système PV accordée aux réseaux

Dans ce système, l'ensemble de l'unité est raccordé au réseau de distribution après réglage des paramètres. L'énergie produite est soit consommée sur place par l'utilisateur et le reste est injecté dans le réseau, soit la totalité est injectée dans le réseau électrique illimité. Ces dernières centrales peuvent être conçues avec ou sans stockage [6].

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

Les systèmes photovoltaïques présentent un grand nombre d'avantages et d'inconvénients qui sont [2] :

2.8.1. Les avantages

Les systèmes photovoltaïques ont plusieurs avantages [2]:

- ils sont non polluants sans émissions ou odeurs discernables.
- ils peuvent être des systèmes autonomes qui fonctionnent sûrement, sans surveillance pendant de longues périodes.

- ils n'ont besoin d'aucun raccordement à une autre source d'énergie ou à un approvisionnement en carburant.
- ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité de système.
- ils peuvent résister à des conditions atmosphériques pénibles comme la neige et la glace.
- une haute fiabilité car l'installation ne comporte pas de pièces mobiles, ce qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées, d'où son utilisation sur les engins spatiaux.
- le système modulaire de panneaux photovoltaïques permet un montage adaptable à des besoins énergétiques variés ; les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications allant du milliwatt au mégawatt.

2.8.1. Les inconvénients

- la fabrication des modules photovoltaïques relève de la haute technologie, ce qui rend le coût très élevé.
- Le rendement réel d'un module photovoltaïque est de l'ordre de 10 à 15 %.
- ils sont tributaires des conditions météorologiques.
- l'énergie issue du générateur photovoltaïque est continue et de faible voltage (< à 30 V) donc il doit être transformé par l'intermédiaire d'un onduleur.
- beaucoup d'appareils vendus sur le marché fonctionnent avec du 230 V alternatif [2].

2.9. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait des descriptions générales sur l'énergie photovoltaïque, tous les éléments ont été introduits (cellule, module, panneau) afin de permettre une bonne compréhension du fonctionnement des systèmes PV. Ce chapitre nous a permis d'explorer le principe de la conversion photovoltaïque ainsi que les différentes technologies utilisées pour y parvenir. Des aspects aussi bien technologiques qu'électriques ont été abordés afin de mieux comprendre l'ensemble du mécanisme de conversion photovoltaïque.

Références bibliographiques

- [1] G. Nouredine, M. Abdelkader, « Réalisation d'un convertisseur DC/DC dans une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque », mémoire de master. Université Larbi Ben M'Hidi de Oum El Bouaghi 2017.
- [2] B. Djamil, « Optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage », Thèse de Magister, 2007, Université Mentuori de Constantine.
- [3] H. Abdelkarim, D. Boudali, « Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque Alimentant d'une Charge Triphasée », mémoire de master. Université Dr. Tahar Moulay de Saïda 2016
- [4] T. Tariq, H. Nouh, « Commande d'un MPPT avec un convertisseur DC/DC pour un système photovoltaïque », mémoire de master. Université Mohamed Boudiaf de Mesila 2019.
- [5] A. Aida, « Caractérisation des cellules photovoltaïques à base d'hétérojonction de silicium a-Si/c-Si », mémoire de master. Université Abou-Bekr Belkaid de Tlemcen 2018.
- [6] B. Fatima, « Modélisation et simulation des sources de production décentralisée Application à l'intégration d'un générateur PV à stockage dans un réseau électrique », Thèse de Doctorat de L'université de Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, 2018.

Chapitre III

Hacheur destinée aux systèmes
photovoltaïques

3.1. Introduction

Un hacheur est un convertisseur DC-DC statique utilisé pour générer une source de tension continue variable à partir d'une source de tension fixe. Ils sont constitués de condensateurs, d'inductances et d'interrupteurs [1].

Afin de concevoir une interface de puissance plus efficace, une étude détaillée d'un convertisseur DC-DC statique non isolé en mode de conduction continue est réalisée. L'analyse se concentre sur le gain de courant et de tension du convertisseur et les limites du semi-conducteur. Le convertisseur élévateur a été choisi dans cette étude en raison de sa structure simple et de son rapport de conversion de tension plus élevé par rapport aux autres topologies [1].

Dans ce chapitre, nous étudierons le problème de connexion de la charge GPV et la nécessité de la phase d'adaptation. En effet, pour qu'un GPV fonctionne à puissance maximale, un étage d'adaptation, qui peut être un convertisseur DC-DC, un BUCK ou un BOOST de tension, doit être inséré entre la source et la charge.

3.2. Connexion directe générateur photovoltaïque-charge

Pour ce type de liaison, une diode est insérée entre le GPV et la charge Figure 3.1, ce qui empêche le GPV de devenir récepteur lorsqu'il n'est plus allumé et lorsqu'il atteint ses limites de fonctionnement dans le récepteur (emballement thermique, avalanche). C'est la méthode la plus couramment utilisée aujourd'hui et présente les avantages d'un faible coût et d'une grande fiabilité [1]

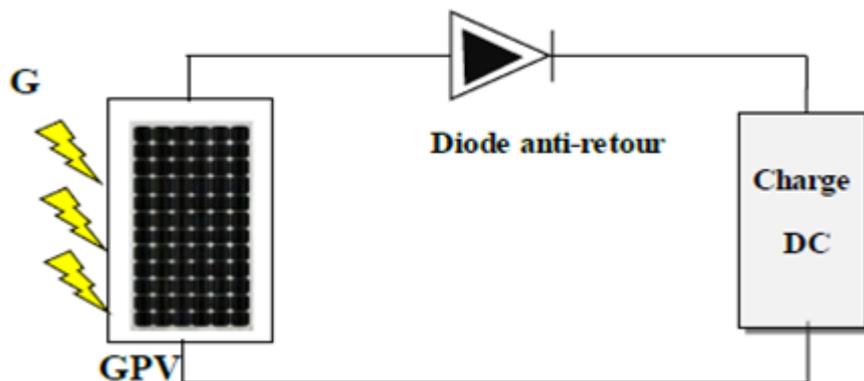


Figure 3.1 : Connexion directe GPV-Charge par le biais d'une diode anti-retour.

Trois types de charges DC typiques existent : une charge purement résistive, une charge capacitive de type source de tension et une charge inductive de type source de courant. Sur la Figure 3.2.

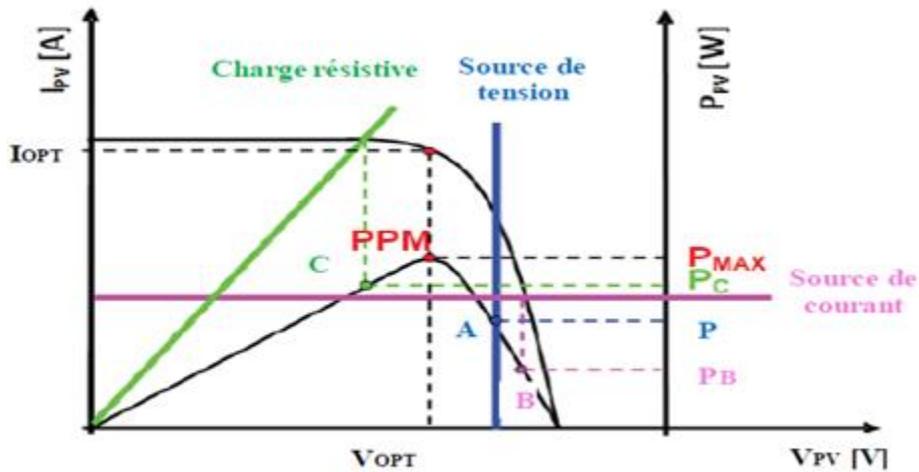


Figure 3.2 : Points de fonctionnement d'un GPV en fonction de la charge en connexion directe.

3.2.1. Connexion indirecte GPV-charge par le biais d'un étage d'adaptation

Pour pallier les défaillances ci-dessus, un convertisseur statique est ajouté entre le GPV et la charge pour optimiser les niveaux de tension et/ou de courant entre les deux éléments Figure 3.3. La structure du convertisseur varie en fonction de la classe de tension (convertisseur "BUCK", "BOOST", "BUCK-BOOST", "CUK" [1]).

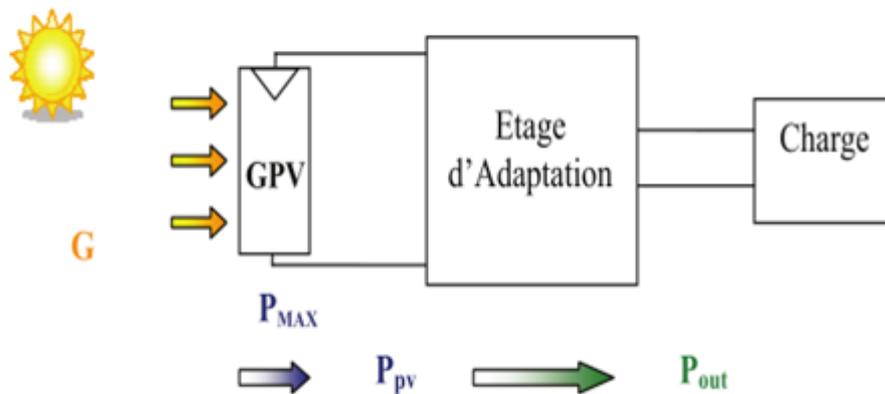


Figure 3.3 : Connexion d'un GPV à une charge à travers un étage d'adaptation.

3.3. Les hacheurs (convertisseurs DC-DC)

Un hacheur (convertisseur DC-DC) est un circuit utilisé pour convertir une tension continue en une autre tension continue avec un rapport de conversion bien défini [2].

$$k = \frac{V_e}{V_s} \quad (3.1)$$

V_s est la tension de sortie, V_e est la tension d'entrée et K est le rapport de transformation.

Elle peut être supérieure à l'unité, dans ce cas on dit que le convertisseur s'appelle un BOOST (booster). Parce qu'il peut être inférieur à l'unité et dans ce cas, il s'appelle step-down [2].

En fait, la tension V_e est la tension fournie par le panneau solaire, et la tension V_s est la tension qui doit alimenter la charge.

Les convertisseurs DC-DC sont devenus des composants essentiels, en particulier dans l'électronique automobile et d'autres applications industrielles. Ils ont remplacé les alimentations linéaires traditionnelles, même à faible puissance, en raison de leur légèreté, de leurs rendements croissants, de leur petite taille et de leur coût réduit [2].

Les hacheurs sont des convertisseurs de type DC-DC utilisés pour contrôler la puissance dans les circuits fonctionnant en courant continu avec une grande flexibilité et un rendement élevé [2].

Pour la conversion de puissance, un rendement élevé doit être maintenu pour éviter la dissipation de puissance et éviter la surchauffe des composants électroniques. Pour cette raison, toutes les conversions de puissance à découpage doivent tourner autour des composants de stockage d'énergie (inductances et condensateurs) et des commutateurs. L'interrupteur de puissance utilisé dépend du niveau de puissance à convertir ou à contrôler. Les MOSFET (Métal Oxide Field Effect Transistors) sont généralement utilisés à des puissances relativement faibles (plusieurs kilowatts), tandis que les IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistors) sont utilisés à des puissances plus élevées. Les thyristors ont été couramment utilisés et acceptés à des niveaux de puissance plus élevés [2].

La Figure 3.4, montre la représentation d'un convertisseur DC-DC, qui peut être utilisé comme interface entre la source et la charge.

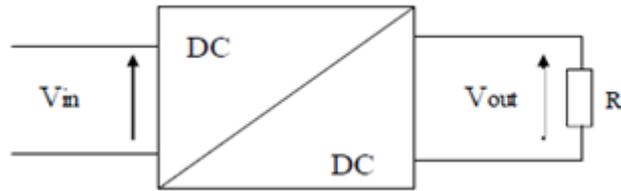


Figure 3.4 : Convertisseur DC/DC.

3.3. 1. Les types des convertisseurs de tension DC/DC

3.3.1.1. Convertisseur BOOST

Nous considérons un convertisseur DC-DC de type BOOSTS ou un hacheur shunt comme une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de valeur supérieure [1].

Il est composé essentiellement d'un interrupteur **K** (comme IGBT ou MOSFET) et d'une diode [3].

➤ Schéma et les formes d'onde des courants et tensions

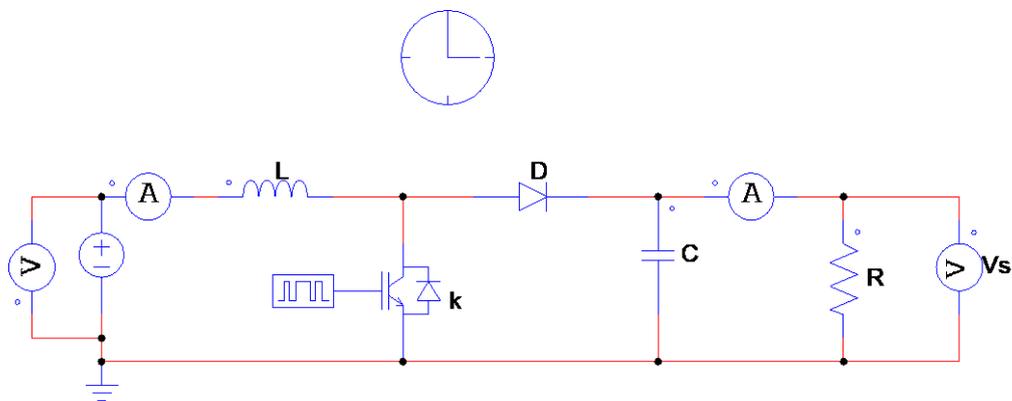


Figure 3.5 : Schéma de convertisseur BOOST.

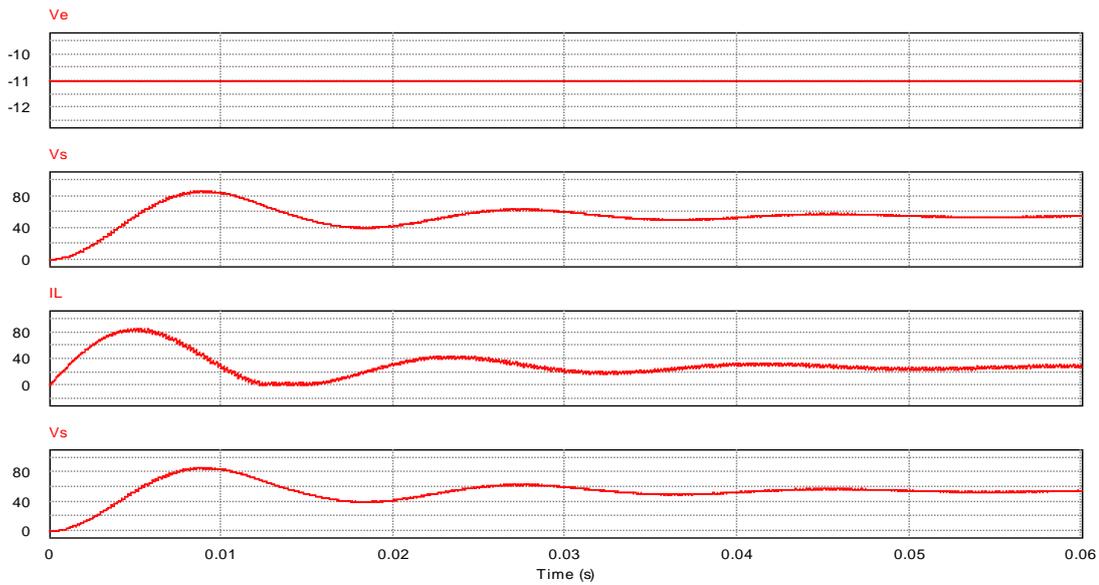


Figure 3.6 : Formes d’ondes des courants et tensions du convertisseur BOOST.

➤ Principe de fonctionnement

On distingue deux modes de fonctionnement selon que le courant dans l’inductance s’annule (conduction discontinue) ou pas (conduction continue).

On s’intéresse au second cas qui est le plus important [3].

- Mode 1 : $0 < t < \alpha T_d$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{K: fermé} \\ \text{D: ouvert} \end{array} \right.$

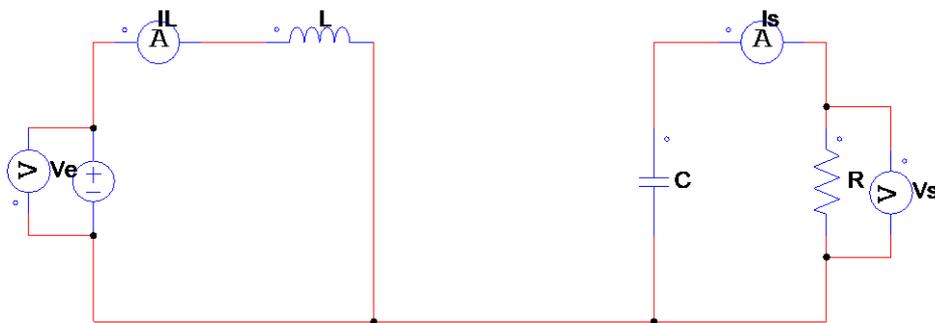


Figure 3.7 : Circuit équivalent du BOOST quand l’interrupteur est fermé.

$$V_e = L \frac{dI_L}{dt} \tag{3.2}$$

$$I_L = I_{\min} + \frac{V_e}{L} t \quad (3.3)$$

I_{\min} : La valeur minimale du courant dans l'inductance.

$T = \alpha T_d$, le courant dans l'inductance atteint sa valeur maximale

$$I_{\max} = I_{\min} + \frac{V_e}{L} \alpha T_d \quad (3.4)$$

- **Mode 2** : $\alpha T_d < t < T_d$ $\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{k: ouvert} \\ \mathbf{D: fermé} \end{array} \right.$

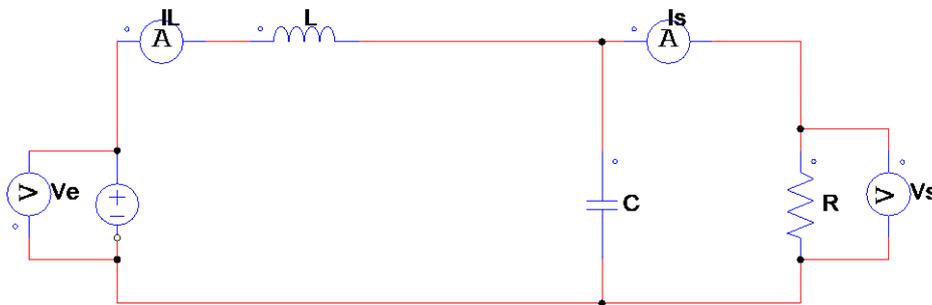


Figure 3.8 : Circuit équivalent du BOOST quand l'interrupteur est ouvert.

$$\frac{di_L}{dt} = V_e - V_s \quad (3.5)$$

$$i_L = I_{\max} + \frac{V_e - V_s}{L} (t - \alpha T_d) \quad (3.6)$$

I_{\min} est la valeur minimale de courant dans l'inductance, à l'instant $t=T_d$

$$I_{\min} = I_{\max} + \frac{V_e - V_s}{L} (1 - \alpha) T_d \quad (3.7)$$

La valeur moyenne de la tension de sortie v_s

$$V_s = \frac{1}{1 - \alpha} V_e \quad (3.8)$$

Nous notons que nous pouvons contrôler la tension de sortie du convertisseur en modifiant sa tension d'entrée ou son rapport cyclique. Celui-ci est toujours compris entre 0 et 1, alors le composant fonctionne en booster

- la valeur moyenne du courant dans l'inductance :

$$I_L = \frac{1}{1 - \alpha} I_s \quad (3.9)$$

- l'ondulation du courant dans l'inductance :

$$\Delta i_L = I_{\max} - I_{\min} \tag{3.10}$$

De l'expression (3.3), Donc :

$$\Delta i_L = \frac{V_e}{L} \alpha T_d = \frac{\alpha V_e}{L f} \tag{3.11}$$

3.3.1.2. Convertisseur BUCK

Un convertisseur abaisseur ou un hacheur série est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de valeur inférieure [1].

- Schéma et les formes d'onde des courants et tensions

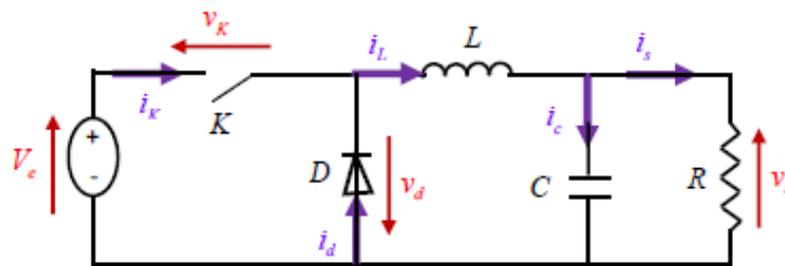


Figure 3.9 : Schéma de convertisseur BUCK.

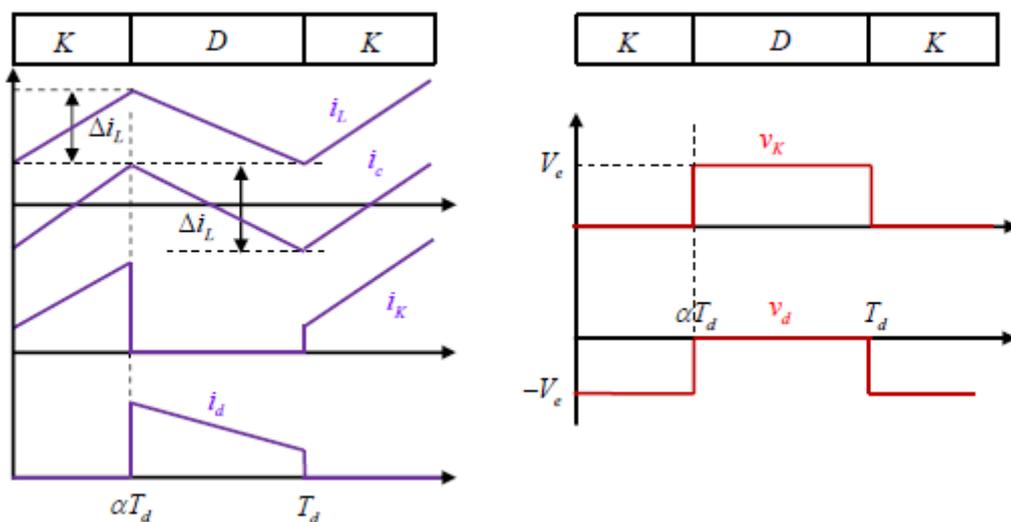


Figure 3.10 : Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur BUCK.

- La valeur moyenne de la tension de sortie :

$$V_s = \alpha V_e \quad (3.12)$$

- l'ondulation de courant dans l'inductance :

$$\Delta i_L = \frac{\alpha(1-\alpha)V_e}{L f} \quad (3.13)$$

- l'ondulation de la tension de sortie :

$$\Delta V_s = \frac{\Delta i_L}{8 C f} = \frac{\alpha(1-\alpha)V_e}{8 C L f^2} \quad (3.14)$$

Donc le convertisseur est abaisseur en tension.

Le courant moyen traversant l'inductance est égal au courant moyen dans la charge :

$$I_L = I_s \quad (3.15)$$

3.3.1.3. Convertisseur BUCK-BOOST

Un convertisseur BUCK-BOOST est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de valeur inférieure ou supérieure avec une polarité opposée [1].

- Schéma et les formes d'ondes des courants et tensions

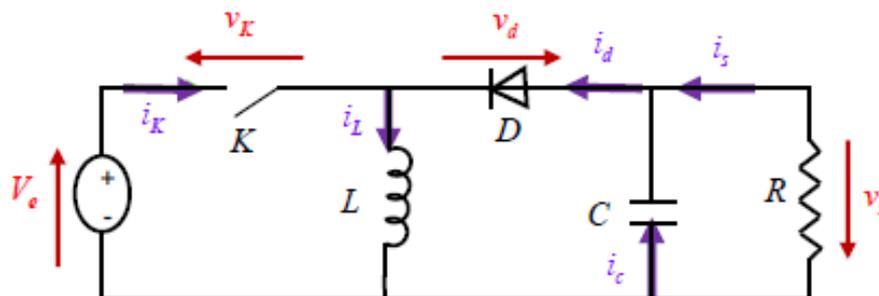


Figure 3.11 : Schéma de convertisseur BUCK-BOOST.

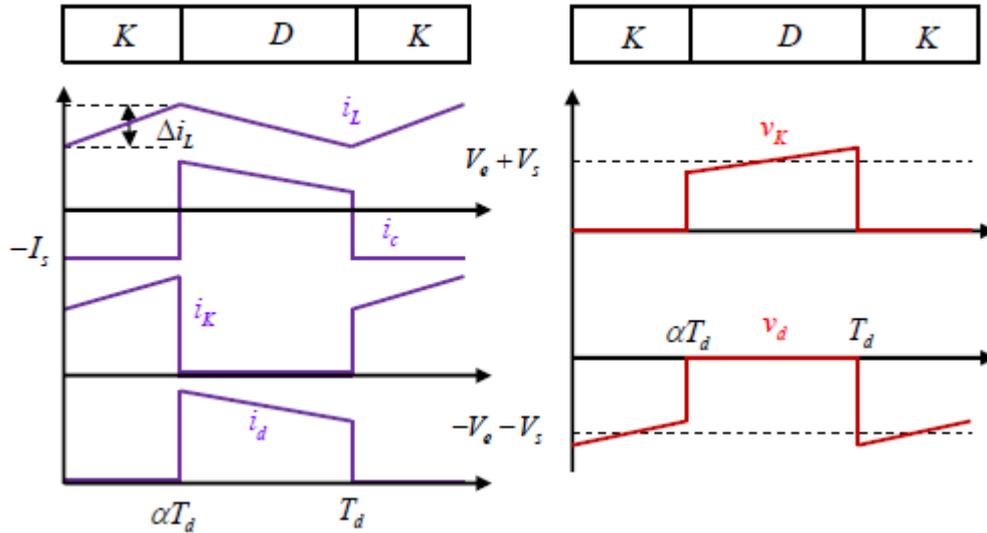


Figure 3.12 : Formes d’ondes des courants et tensions du convertisseur BUCK-BOOST.

- La tension de sortie moyenne :

$$V_s = \frac{\alpha V_e}{1 - \alpha} \quad (3.16)$$

- L’ondulation de courant dans l’inductance :

$$\Delta i_L = \frac{\alpha V_e}{L f} \quad (3.17)$$

- l’ondulation de la tension de sortie:

$$\Delta V_s = \frac{\alpha I_s}{C f} = \frac{\alpha^2 V_e}{(1 - \alpha) R C f} \quad (3.18)$$

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 l'amplitude de la tension d'entrée, en fonction de la valeur du rapport cyclique. C'est un onduleur BUCK-BOOST de tension

- Le courant moyen traversant l’inductance :

$$I_L = \frac{I_s}{1 - \alpha} \quad (3.19)$$

3.3.1.4. Convertisseur CUK

Le convertisseur CUK est comme le convertisseur BUCK-BOOST, peut produire une tension de sortie plus grande ou plus petite que celle de l’entrée et de polarité inverse [4].

- Schéma et les formes d'ondes des courants et tensions

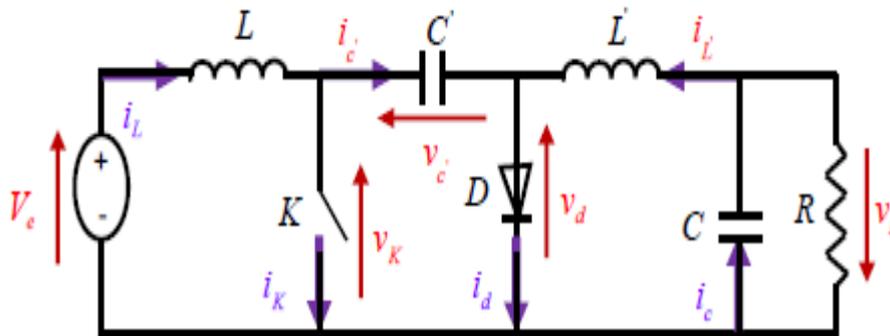


Figure 3.13 : Schéma de convertisseur CUK.

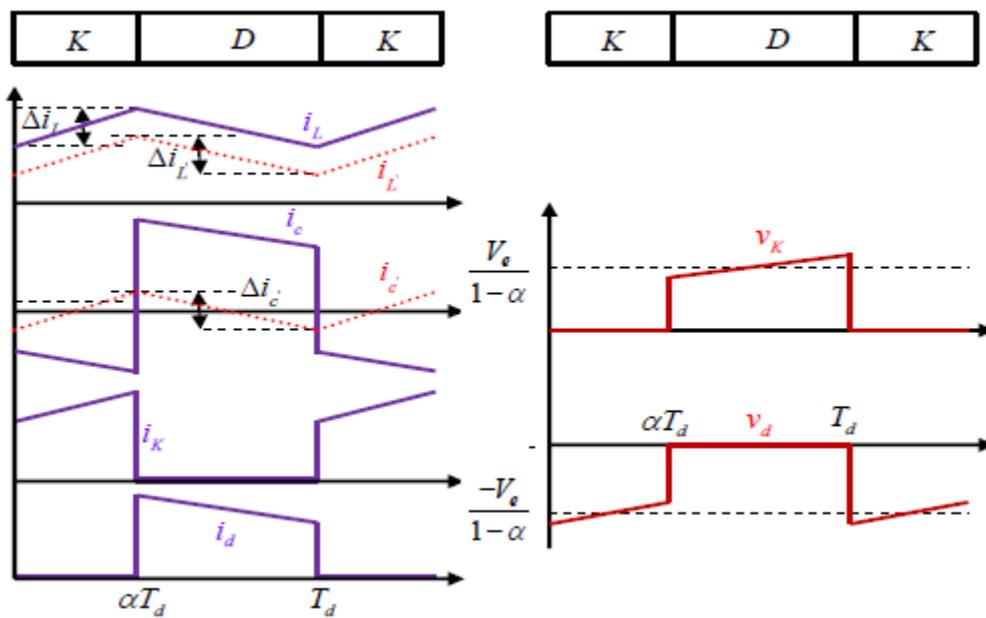


Figure 3.14 : Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur CUK.

- La tension de sortie moyenne :

$$V_s = \frac{\alpha V_e}{1 - \alpha} \tag{3.20}$$

- les courants moyens :

$$I_L = \left(\frac{\alpha}{1 - \alpha}\right) I_L' = \left(\frac{\alpha}{1 - \alpha}\right) I_s \tag{3.21}$$

- Les ondulations de courant dans les deux inductances :

$$\Delta i_L = \frac{\alpha V_e}{L f} \quad (3.22)$$

$$\Delta i'_L = \frac{\alpha V_e}{L' f} \quad (3.23)$$

- L'ondulation de la tension de sortie:

$$\Delta V_s = \frac{\Delta i'_L}{8 C f} = \frac{\alpha V_e}{8 L' C f^2} \quad (3.24)$$

- L'ondulation de la tension aux bornes de C' :

$$\Delta V_{C'} = \frac{(1-\alpha)I_L}{C' f} = \frac{\alpha^2 V_e}{(1-\alpha)R C' f} \quad (3.25)$$

3.4. Récapitulatif d'analyse et choix du convertisseur

Un panneau solaire photovoltaïque est une génératrice continue basse tension. Il est préférable de placer un dispositif d'amplification entre la source et la charge comme étage d'adaptation d'impédance. Tous les convertisseurs mentionnés ci-dessus, à l'exception du Buck, peuvent agir comme un booster. De plus, le rapport cyclique des structures BUCK-BOOST et CUK est supérieur à la moitié. Si l'on regarde la complexité de la structure, BOOST est le plus simple. Les contraintes de tension et de courant sur les commutateurs et les diodes sont presque similaires pour différentes topologies BOOST [3].

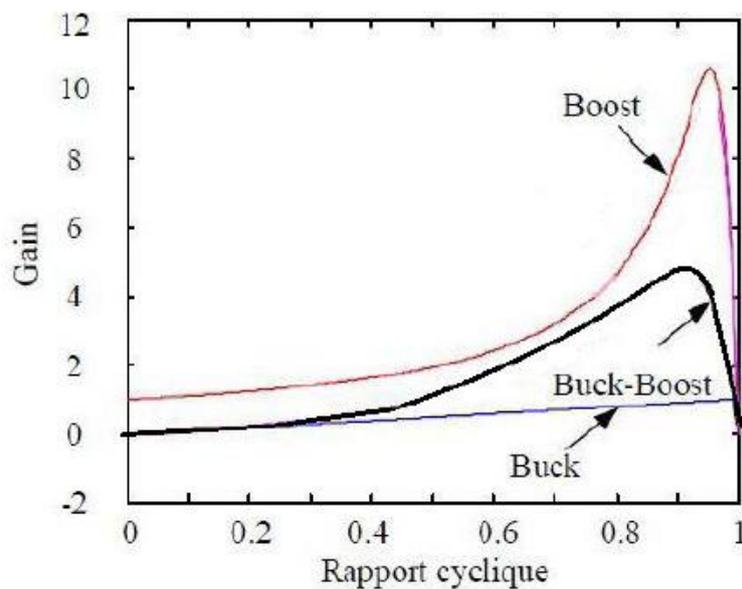


Figure 3.15 : Evolution du gain en tension en tenant compte des éléments parasites des convertisseurs.

Si on les compare du point de vue gain en tension, aussi le Boost prend la première place comme le montre la figure 3.15 qui donne l'évolution du gain en tension en fonction du rapport cyclique.

3.5. Avantages de convertisseur BOOST

Bien que les convertisseurs BUCK soient très efficaces dans les systèmes avec des alimentations électriques conventionnelles, les convertisseurs BOOST peuvent être plus adaptés aux systèmes PV avec suivi du point de puissance maximum, puisque le convertisseur fonctionne en mode CC, extrayant autant que possible de la cellule solaire de puissance. Par conséquent, l'efficacité énergétique du convertisseur BOOST peut être supérieure à celle du convertisseur BUCK. Les convertisseurs BOOST sont généralement utilisés pour obtenir des tensions de sortie plus élevées, tandis que les convertisseurs abaisseurs sont utilisés pour réduire les tensions de sortie [1]

3.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exposé brièvement quelques topologies des convertisseurs à découpage (BUCK, BOOST, BUCK-BOOST), utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités ainsi que pour l'adaptation des panneaux solaires avec les différentes charges.

Ce type de convertisseurs n'est constitué que par des éléments réactifs (Selfs, Capacités) qui dans le cas idéal, ne consomment aucune énergie. C'est pour cette raison qu'ils sont caractérisés par un grand rendement. Chaque topologie qu'on a étudiée contient des avantages, mais l'importance du choix d'un convertisseur est faite par le domaine d'application, le choix du convertisseur BOOST est justifié par un gain et un rendement élevés ainsi que la simplicité du circuit.

Le chapitre suivant est consacré à la simulation du modèle convertisseur BOOST connecté à un système PV.

Références bibliographiques

- [1] Z. Seyfeddine, O. Mohamed, « Etude et simulation d'un hacheur Boost pour suivre le point de puissance maximal (MPPT) », mémoire de master. Université Saad dahlab de Blida 2017.
- [2] B. Samiha, B. Malika, « Optimisation énergétique de chaine de conversion d'énergie photovoltaïque », mémoire de master. Université Mohamed Boudiaf de Mesila, 2021.
- [3] B. Abed Elhakim, « Conception et implémentation d'une commande de haute performance pour une chaine de conversion photovoltaïque autonome », Thèse de Doctorat de L'université Ferhat Abbas de Setif1, Octobre 2015.
- [4] B. Mansour, Cours « Convertisseur Continu-Continu».

Chapitre III

Hacheur destinée aux systèmes
photovoltaïques

3.1. Introduction

Un hacheur est un convertisseur DC-DC statique utilisé pour générer une source de tension continue variable à partir d'une source de tension fixe. Ils sont constitués de condensateurs, d'inductances et d'interrupteurs [1].

Afin de concevoir une interface de puissance plus efficace, une étude détaillée d'un convertisseur DC-DC statique non isolé en mode de conduction continue est réalisée. L'analyse se concentre sur le gain de courant et de tension du convertisseur et les limites du semi-conducteur. Le convertisseur élévateur a été choisi dans cette étude en raison de sa structure simple et de son rapport de conversion de tension plus élevé par rapport aux autres topologies [1].

Dans ce chapitre, nous étudierons le problème de connexion de la charge GPV et la nécessité de la phase d'adaptation. En effet, pour qu'un GPV fonctionne à puissance maximale, un étage d'adaptation, qui peut être un convertisseur DC-DC, un BUCK ou un BOOST de tension, doit être inséré entre la source et la charge.

3.2. Connexion directe générateur photovoltaïque-charge

Pour ce type de liaison, une diode est insérée entre le GPV et la charge Figure 3.1, ce qui empêche le GPV de devenir récepteur lorsqu'il n'est plus allumé et lorsqu'il atteint ses limites de fonctionnement dans le récepteur (emballement thermique, avalanche). C'est la méthode la plus couramment utilisée aujourd'hui et présente les avantages d'un faible coût et d'une grande fiabilité [1]

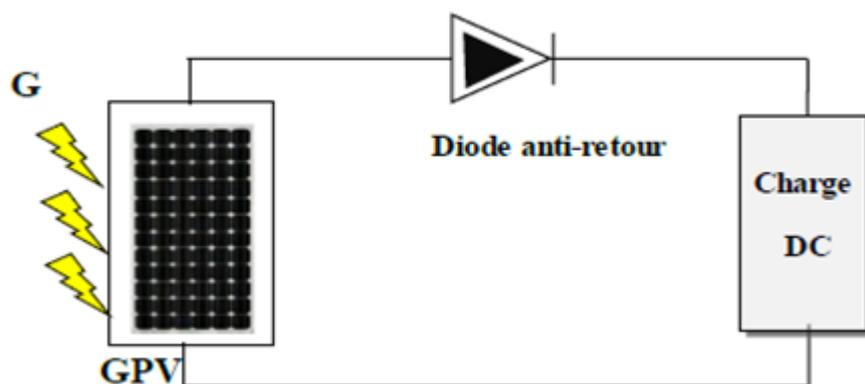


Figure 3.1 : Connexion directe GPV-Charge par le biais d'une diode anti-retour.

Trois types de charges DC typiques existent : une charge purement résistive, une charge capacitive de type source de tension et une charge inductive de type source de courant. Sur la Figure 3.2.

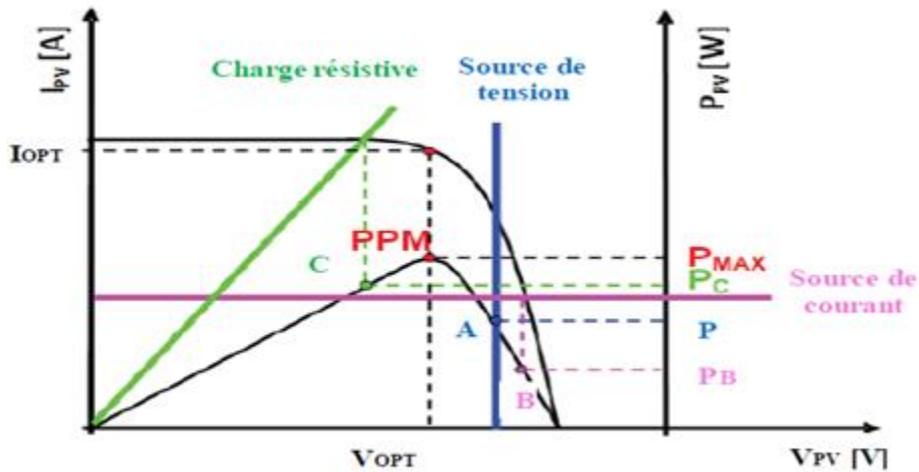


Figure 3.2 : Points de fonctionnement d'un GPV en fonction de la charge en connexion directe.

3.2.1. Connexion indirecte GPV-charge par le biais d'un étage d'adaptation

Pour pallier les défaillances ci-dessus, un convertisseur statique est ajouté entre le GPV et la charge pour optimiser les niveaux de tension et/ou de courant entre les deux éléments Figure 3.3. La structure du convertisseur varie en fonction de la classe de tension (convertisseur "BUCK", "BOOST", "BUCK-BOOST", "CUK" [1].

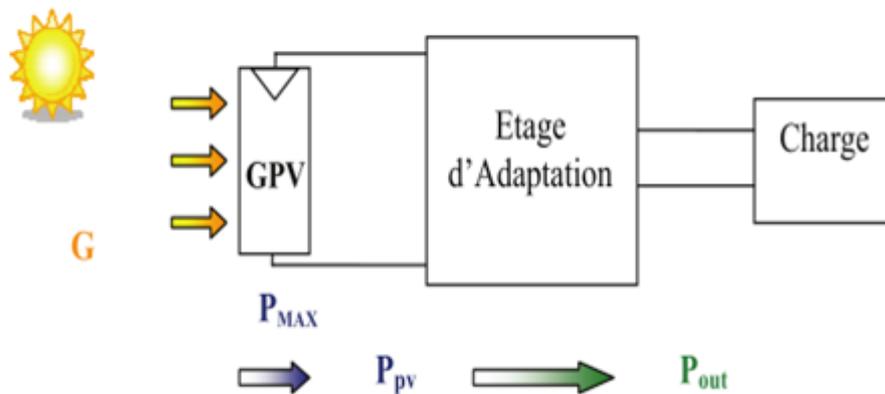


Figure 3.3 : Connexion d'un GPV à une charge à travers un étage d'adaptation.

3.3. Les hacheurs (convertisseurs DC-DC)

Un hacheur (convertisseur DC-DC) est un circuit utilisé pour convertir une tension continue en une autre tension continue avec un rapport de conversion bien défini [2].

$$k = \frac{V_e}{V_s} \quad (3.1)$$

V_s est la tension de sortie, V_e est la tension d'entrée et K est le rapport de transformation.

Elle peut être supérieure à l'unité, dans ce cas on dit que le convertisseur s'appelle un BOOST (booster). Parce qu'il peut être inférieur à l'unité et dans ce cas, il s'appelle step-down [2].

En fait, la tension V_e est la tension fournie par le panneau solaire, et la tension V_s est la tension qui doit alimenter la charge.

Les convertisseurs DC-DC sont devenus des composants essentiels, en particulier dans l'électronique automobile et d'autres applications industrielles. Ils ont remplacé les alimentations linéaires traditionnelles, même à faible puissance, en raison de leur légèreté, de leurs rendements croissants, de leur petite taille et de leur coût réduit [2].

Les hacheurs sont des convertisseurs de type DC-DC utilisés pour contrôler la puissance dans les circuits fonctionnant en courant continu avec une grande flexibilité et un rendement élevé [2].

Pour la conversion de puissance, un rendement élevé doit être maintenu pour éviter la dissipation de puissance et éviter la surchauffe des composants électroniques. Pour cette raison, toutes les conversions de puissance à découpage doivent tourner autour des composants de stockage d'énergie (inductances et condensateurs) et des commutateurs. L'interrupteur de puissance utilisé dépend du niveau de puissance à convertir ou à contrôler. Les MOSFET (Métal Oxide Field Effect Transistors) sont généralement utilisés à des puissances relativement faibles (plusieurs kilowatts), tandis que les IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistors) sont utilisés à des puissances plus élevées. Les thyristors ont été couramment utilisés et acceptés à des niveaux de puissance plus élevés [2].

La Figure 3.4, montre la représentation d'un convertisseur DC-DC, qui peut être utilisé comme interface entre la source et la charge.

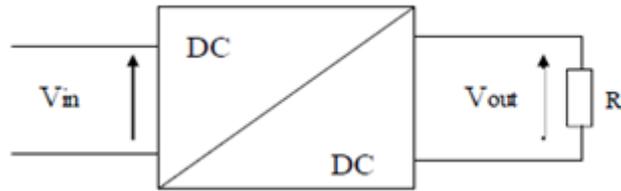


Figure 3.4 : Convertisseur DC/DC.

3.3. 1. Les types des convertisseurs de tension DC/DC

3.3.1.1. Convertisseur BOOST

Nous considérons un convertisseur DC-DC de type BOOSTS ou un hacheur shunt comme une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de valeur supérieure [1].

Il est composé essentiellement d'un interrupteur **K** (comme IGBT ou MOSFET) et d'une diode [3].

➤ Schéma et les formes d'onde des courants et tensions

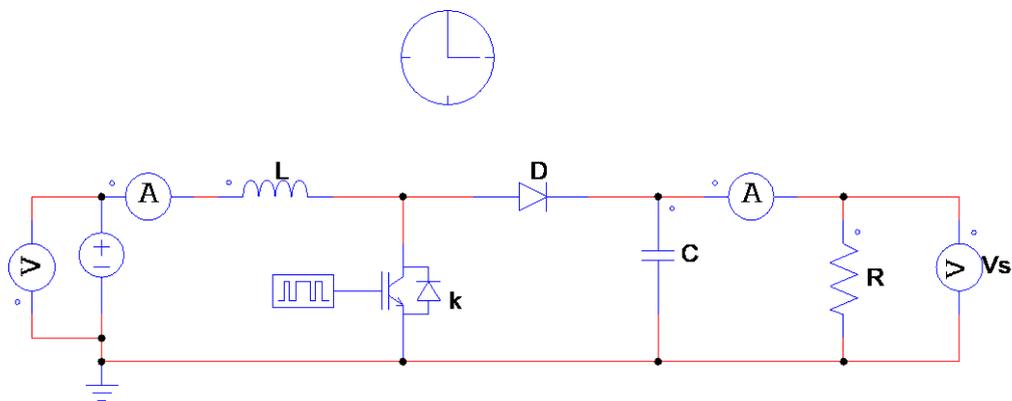


Figure 3.5 : Schéma de convertisseur BOOST.

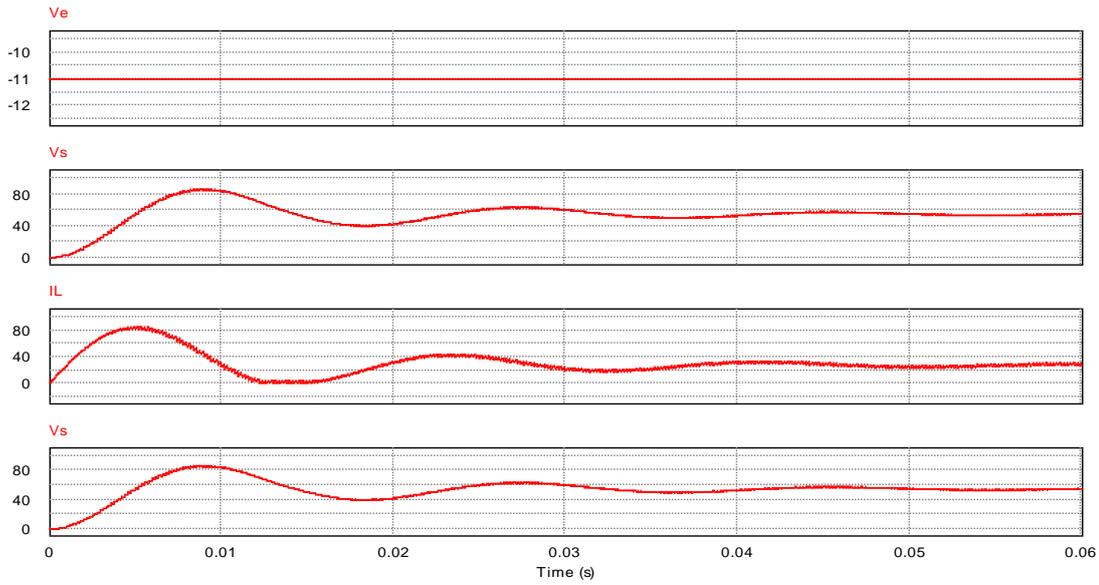


Figure 3.6 : Formes d’ondes des courants et tensions du convertisseur BOOST.

➤ Principe de fonctionnement

On distingue deux modes de fonctionnement selon que le courant dans l’inductance s’annule (conduction discontinue) ou pas (conduction continue).

On s’intéresse au second cas qui est le plus important [3].

- Mode 1 : $0 < t < \alpha T_d$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{K: fermé} \\ \text{D: ouvert} \end{array} \right.$

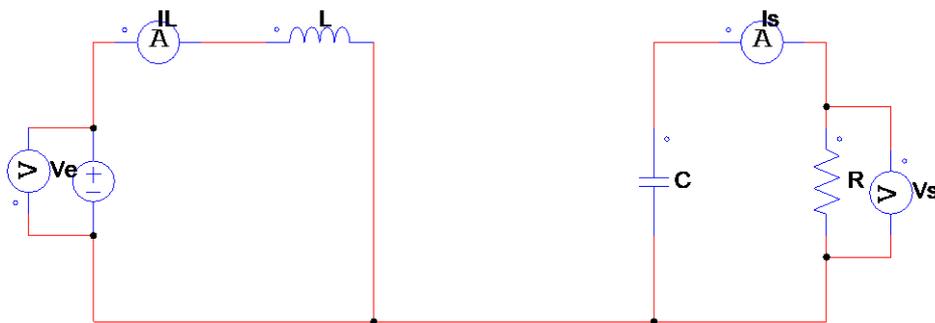


Figure 3.7 : Circuit équivalent du BOOST quand l’interrupteur est fermé.

$$V_e = L \frac{dI_L}{dt} \tag{3.2}$$

$$I_L = I_{\min} + \frac{V_e}{L} t \quad (3.3)$$

I_{\min} : La valeur minimale du courant dans l'inductance.

$T = \alpha T_d$, le courant dans l'inductance atteint sa valeur maximale

$$I_{\max} = I_{\min} + \frac{V_e}{L} \alpha T_d \quad (3.4)$$

- **Mode 2** : $\alpha T_d < t < T_d$ $\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{k: ouvert} \\ \mathbf{D: fermé} \end{array} \right.$

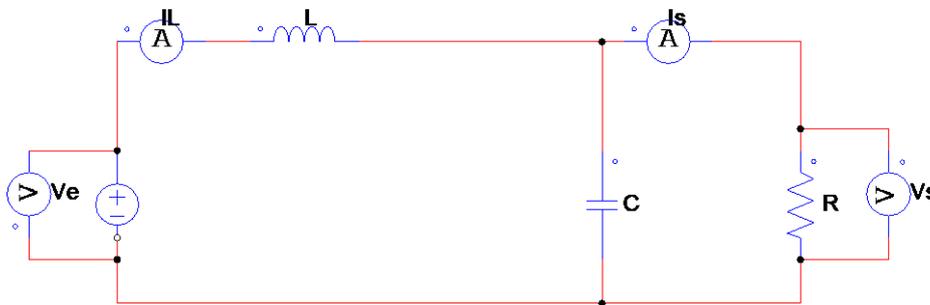


Figure 3.8 : Circuit équivalent du BOOST quand l'interrupteur est ouvert.

$$\frac{di_L}{dt} = V_e - V_s \quad (3.5)$$

$$i_L = I_{\max} + \frac{V_e - V_s}{L} (t - \alpha T_d) \quad (3.6)$$

I_{\min} est la valeur minimale de courant dans l'inductance, à l'instant $t=T_d$

$$I_{\min} = I_{\max} + \frac{V_e - V_s}{L} (1 - \alpha) T_d \quad (3.7)$$

La valeur moyenne de la tension de sortie v_s

$$V_s = \frac{1}{1 - \alpha} V_e \quad (3.8)$$

Nous notons que nous pouvons contrôler la tension de sortie du convertisseur en modifiant sa tension d'entrée ou son rapport cyclique. Celui-ci est toujours compris entre 0 et 1, alors le composant fonctionne en booster

- la valeur moyenne du courant dans l'inductance :

$$I_L = \frac{1}{1 - \alpha} I_s \quad (3.9)$$

- l'ondulation du courant dans l'inductance :

$$\Delta i_L = I_{\max} - I_{\min} \tag{3.10}$$

De l'expression (3.3), Donc :

$$\Delta i_L = \frac{V_e}{L} \alpha T_d = \frac{\alpha V_e}{L f} \tag{3.11}$$

3.3.1.2. Convertisseur BUCK

Un convertisseur abaisseur ou un hacheur série est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de valeur inférieure [1].

- Schéma et les formes d'onde des courants et tensions

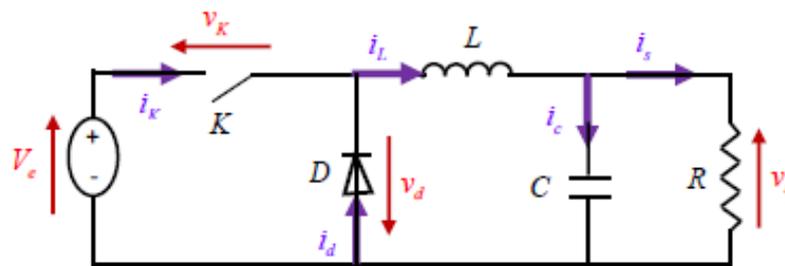


Figure 3.9 : Schéma de convertisseur BUCK.

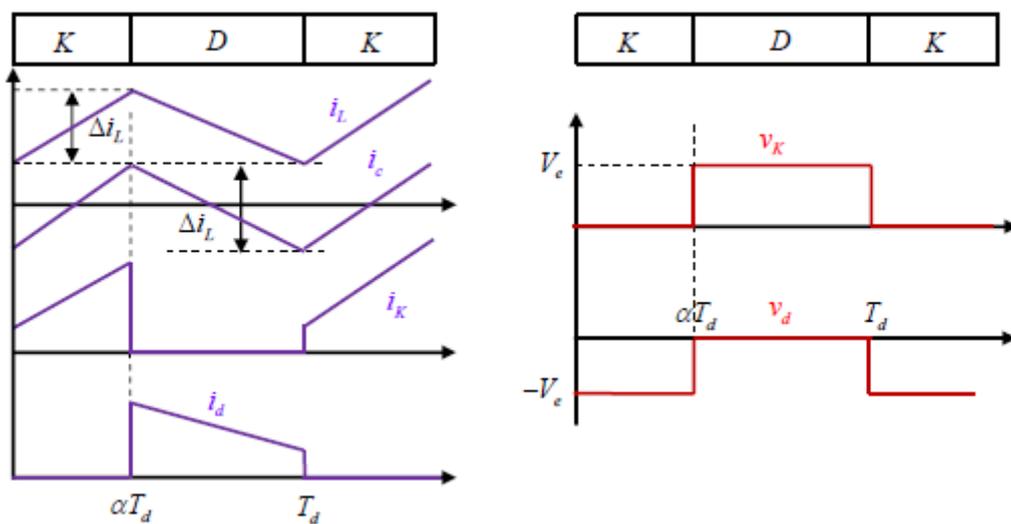


Figure 3.10 : Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur BUCK.

- La valeur moyenne de la tension de sortie :

$$V_s = \alpha V_e \quad (3.12)$$

- l'ondulation de courant dans l'inductance :

$$\Delta i_L = \frac{\alpha(1-\alpha)V_e}{L f} \quad (3.13)$$

- l'ondulation de la tension de sortie :

$$\Delta V_s = \frac{\Delta i_L}{8 C f} = \frac{\alpha(1-\alpha)V_e}{8 C L f^2} \quad (3.14)$$

Donc le convertisseur est abaisseur en tension.

Le courant moyen traversant l'inductance est égal au courant moyen dans la charge :

$$I_L = I_s \quad (3.15)$$

3.3.1.3. Convertisseur BUCK-BOOST

Un convertisseur BUCK-BOOST est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de valeur inférieure ou supérieure avec une polarité opposée [1].

- Schéma et les formes d'ondes des courants et tensions

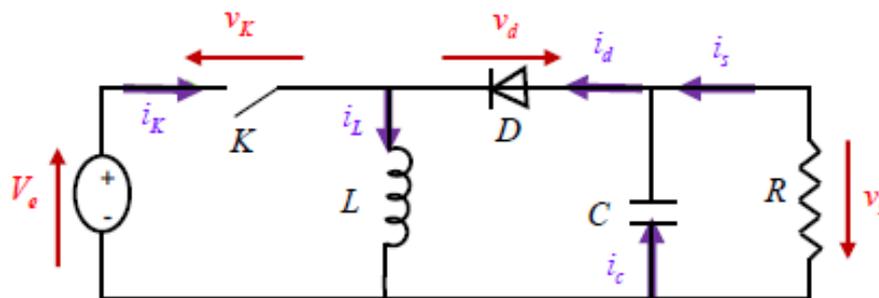


Figure 3.11 : Schéma de convertisseur BUCK-BOOST.

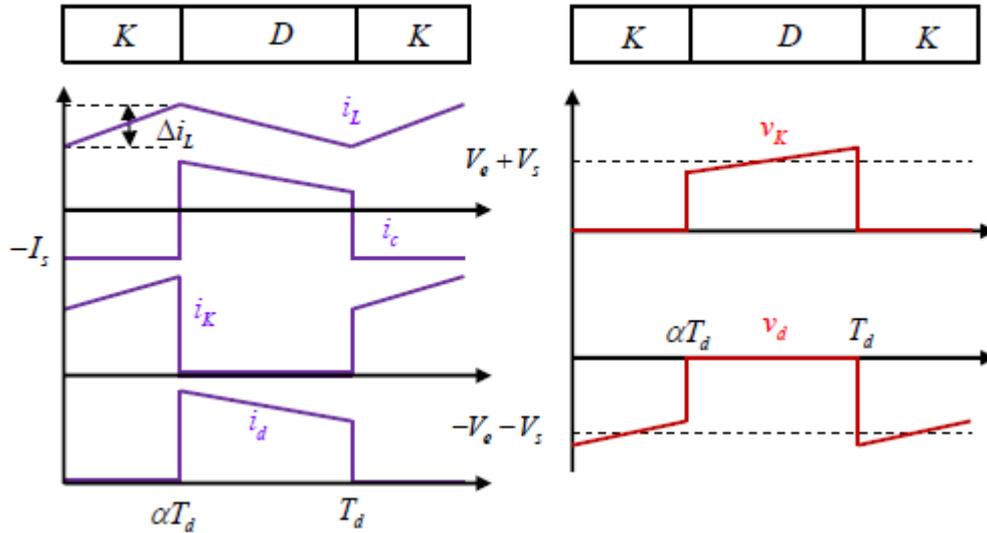


Figure 3.12 : Formes d’ondes des courants et tensions du convertisseur BUCK-BOOST.

- La tension de sortie moyenne :

$$V_s = \frac{\alpha V_e}{1 - \alpha} \quad (3.16)$$

- L’ondulation de courant dans l’inductance :

$$\Delta i_L = \frac{\alpha V_e}{L f} \quad (3.17)$$

- l’ondulation de la tension de sortie:

$$\Delta V_s = \frac{\alpha I_s}{C f} = \frac{\alpha^2 V_e}{(1 - \alpha) R C f} \quad (3.18)$$

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 l’amplitude de la tension d’entrée, en fonction de la valeur du rapport cyclique. C’est un onduleur BUCK-BOOST de tension

- Le courant moyen traversant l’inductance :

$$I_L = \frac{I_s}{1 - \alpha} \quad (3.19)$$

3.3.1.4. Convertisseur CUK

Le convertisseur CUK est comme le convertisseur BUCK-BOOST, peut produire une tension de sortie plus grande ou plus petite que celle de l’entrée et de polarité inverse [4].

- Schéma et les formes d'ondes des courants et tensions

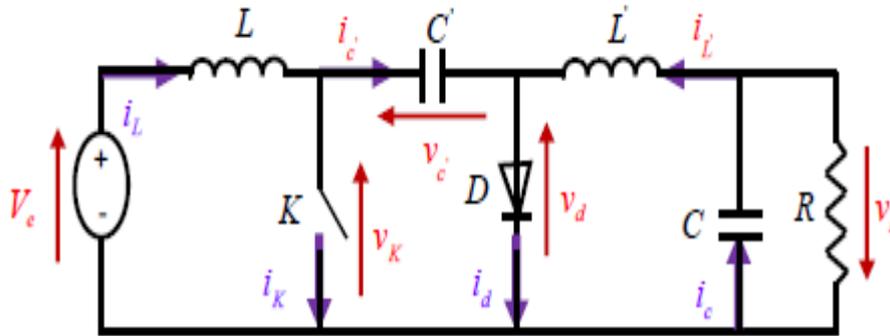


Figure 3.13 : Schéma de convertisseur CUK.

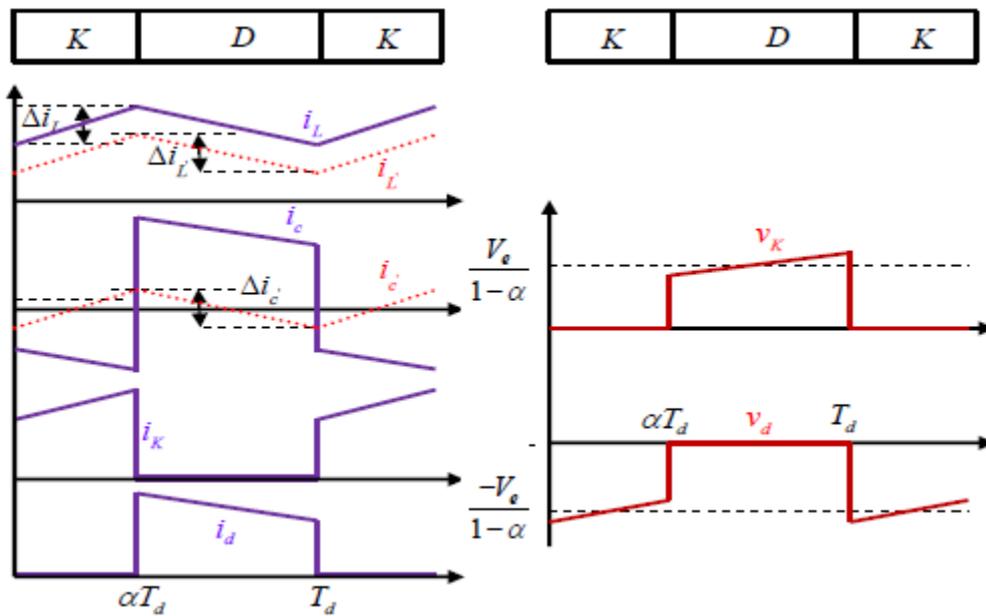


Figure 3.14 : Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur CUK.

- La tension de sortie moyenne :

$$V_s = \frac{\alpha V_e}{1 - \alpha} \tag{3.20}$$

- les courants moyens :

$$I_L = \left(\frac{\alpha}{1 - \alpha}\right) I_L' = \left(\frac{\alpha}{1 - \alpha}\right) I_s \tag{3.21}$$

- Les ondulations de courant dans les deux inductances :

$$\Delta i_L = \frac{\alpha V_e}{L f} \quad (3.22)$$

$$\Delta i'_L = \frac{\alpha V_e}{L' f} \quad (3.23)$$

- L'ondulation de la tension de sortie:

$$\Delta V_s = \frac{\Delta i'_L}{8 C f} = \frac{\alpha V_e}{8 L' C f^2} \quad (3.24)$$

- L'ondulation de la tension aux bornes de C' :

$$\Delta V_{C'} = \frac{(1-\alpha)I_L}{C' f} = \frac{\alpha^2 V_e}{(1-\alpha)R C' f} \quad (3.25)$$

3.4. Récapitulatif d'analyse et choix du convertisseur

Un panneau solaire photovoltaïque est une génératrice continue basse tension. Il est préférable de placer un dispositif d'amplification entre la source et la charge comme étage d'adaptation d'impédance. Tous les convertisseurs mentionnés ci-dessus, à l'exception du Buck, peuvent agir comme un booster. De plus, le rapport cyclique des structures BUCK-BOOST et CUK est supérieur à la moitié. Si l'on regarde la complexité de la structure, BOOST est le plus simple. Les contraintes de tension et de courant sur les commutateurs et les diodes sont presque similaires pour différentes topologies BOOST [3].

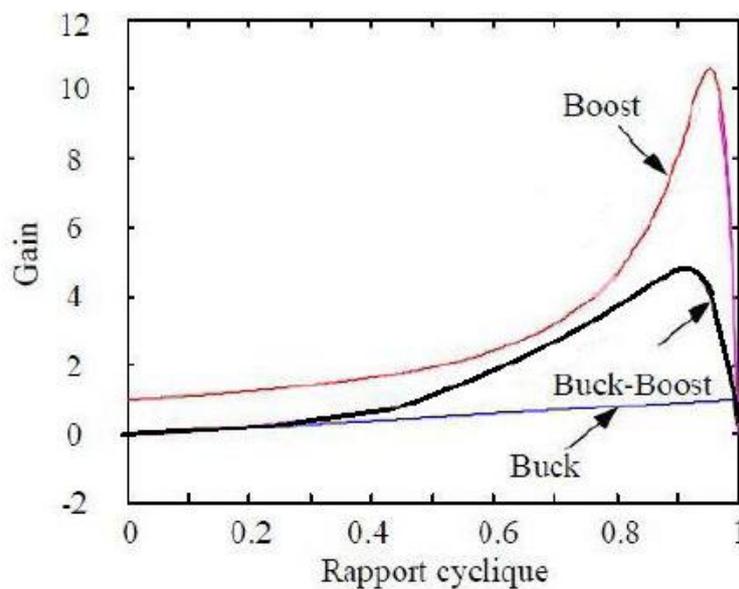


Figure 3.15 : Evolution du gain en tension en tenant compte des éléments parasites des convertisseurs.

Si on les compare du point de vue gain en tension, aussi le Boost prend la première place comme le montre la figure 3.15 qui donne l'évolution du gain en tension en fonction du rapport cyclique.

3.5. Avantages de convertisseur BOOST

Bien que les convertisseurs BUCK soient très efficaces dans les systèmes avec des alimentations électriques conventionnelles, les convertisseurs BOOST peuvent être plus adaptés aux systèmes PV avec suivi du point de puissance maximum, puisque le convertisseur fonctionne en mode CC, extrayant autant que possible de la cellule solaire de puissance. Par conséquent, l'efficacité énergétique du convertisseur BOOST peut être supérieure à celle du convertisseur BUCK. Les convertisseurs BOOST sont généralement utilisés pour obtenir des tensions de sortie plus élevées, tandis que les convertisseurs abaisseurs sont utilisés pour réduire les tensions de sortie [1]

3.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exposé brièvement quelques topologies des convertisseurs à découpage (BUCK, BOOST, BUCK-BOOST), utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités ainsi que pour l'adaptation des panneaux solaires avec les différentes charges.

Ce type de convertisseurs n'est constitué que par des éléments réactifs (Selfs, Capacités) qui dans le cas idéal, ne consomment aucune énergie. C'est pour cette raison qu'ils sont caractérisés par un grand rendement. Chaque topologie qu'on a étudiées contient des avantages, mais l'importance du choix d'un convertisseur est fait par le domaine d'application, le choix du convertisseur BOOST est justifié par un gain et un rendement élevés ainsi la simplicité du circuit.

Le chapitre suivant est consacré à la simulation du modèle convertisseur BOOST connecté à un système PV.

Références bibliographiques

- [1] Z. Seyfeddine, O. Mohamed, « Etude et simulation d'un hacheur Boost pour suivre le point de puissance maximal (MPPT) », mémoire de master. Université Saad dahlab de Blida 2017.
- [2] B. Samiha, B. Malika, « Optimisation énergétique de chaine de conversion d'énergie photovoltaïque », mémoire de master. Université Mohamed Boudiaf de Mesila, 2021.
- [3] B. Abed Elhakim, « Conception et implémentation d'une commande de haute performance pour une chaine de conversion photovoltaïque autonome », Thèse de Doctorat de L'université Ferhat Abbas de Setif1, Octobre 2015.
- [4] B. Mansour, Cours « Convertisseur Continu-Continu».

Chapitre IV

Simulation et évaluation des résultats

4.1. Introduction

Dans ce chapitre, on présentera une étude de modélisation et de simulation d'un système photovoltaïque commandé par la commande STATE FLWO ainsi que le convertisseur DC-DC de type BOOST élévateur avec une charge résistive.

La simulation et la modélisation ont été effectuées dans l'environnement MATLAB/SIMULINK

4.2. La commande STATE FLOW

State flow fournit un langage graphique qui comprend des diagrammes de transition d'état, des organigrammes, des tables de transition d'état et des tables de vérité. Vous pouvez utiliser pour décrire comment les algorithmes **MATLAB** et les modèles **Simulink** réagissent aux signaux d'entrée, aux événements et aux conditions temporelles.

State flow vous permet de concevoir et de développer le contrôle de supervision, la planification des tâches, la gestion des pannes, les protocoles de communication, les interfaces utilisateur et les systèmes hybrides.

Avec **State flow**, vous modélisez une logique de décision combinatoire et séquentielle qui peut être simulée en tant que bloc dans un modèle **Simulink** ou exécutée en tant qu'objet dans MATLAB. L'animation graphique vous permet d'analyser et de déboguer votre logique pendant son exécution. Les vérifications au moment de l'édition et de l'exécution garantissent la cohérence et l'exhaustivité de la conception avant la mise en œuvre.

La bibliothèque **State flow** comporte quatre éléments :

« Chart », « Chart (MATLAB) », « State Transition Table » et enfin « TruthTable ».

- a. **Le chart** permet de construire un diagramme état– transition.
- b. **Chart (MATLAB)** permet aussi la création d'un diagramme état-transition mais en utilisant des expressions ou des structures **MATLAB** pour décrire un comportement logique. Ces expressions peuvent être présentes aussi bien dans un état que dans une transition.
- c. **State Transition Table** génère automatiquement un diagramme d'état-transition à partir d'une table qui précise tous les états et toutes les transitions.
- d. Enfin « **Truth Table** » permet la création de table de vérité qui décrira le comportement combinatoire d'un système.

$$\alpha = \frac{V_e - V_s}{V_s}$$

$$\alpha = \frac{10 - 50}{50} \Rightarrow \alpha = 0.8$$

b- L'inductance L :

De l'équation (3.4) l'inductance est :

$$L = \frac{V_e \alpha T_d}{I_{\max} - I_{\min}} \tag{4.1}$$

$$L = \frac{10 * 0.8 * \frac{1}{5000}}{7 - 3} \Rightarrow L = 4e^{-4}H$$

c- La capacité C :

$$C = \frac{I_L \alpha T}{\Delta v_s} \tag{4.2}$$

$$C = \frac{5 * 0.8}{1 * 5000} \Rightarrow C = 8e^{-4} F$$

4.3.3. Simulation du convertisseur BOOST

Le schéma électrique de la figure 4.1 du convertisseur BOOST dans l'environnement Matlab/Simulink est représenté par la figure 4.2.

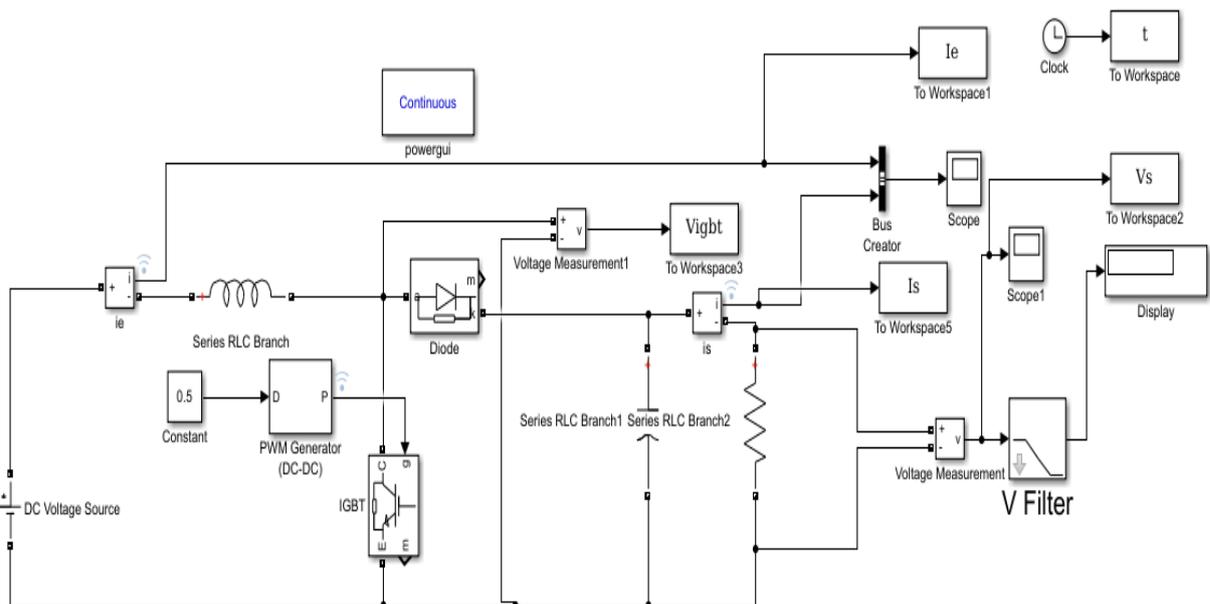


Figure 4.2 : Modèle de simulation d'un convertisseur BOOST.

4.3.3.1. Les résultats de simulation pour $\alpha = 0.5$ et $V_e = 10V$

La simulation est réalisée par l'intégration d'une tension à l'entrée $V_e = 10V$ pour voir le comportement du convertisseur BOOST.

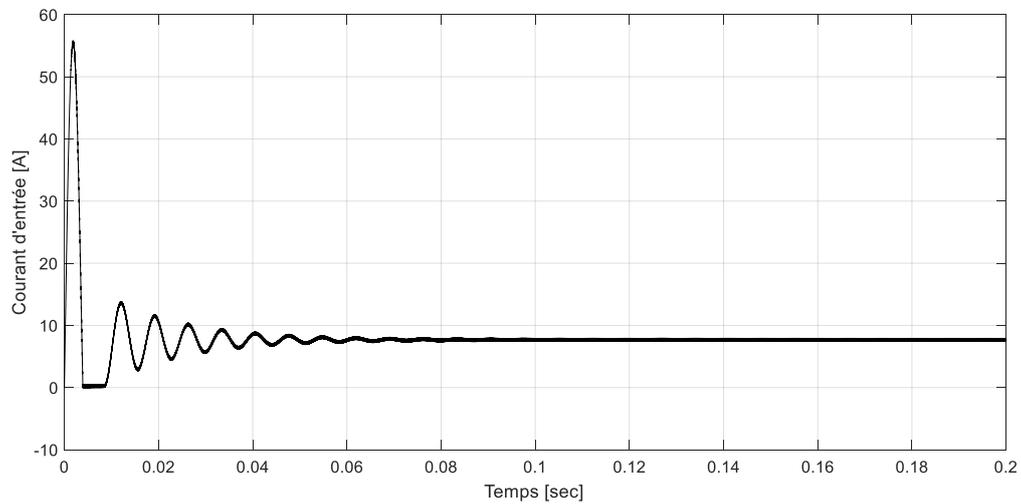


Figure 4.3 : Réponse du courant d'entrée du convertisseur BOOST.

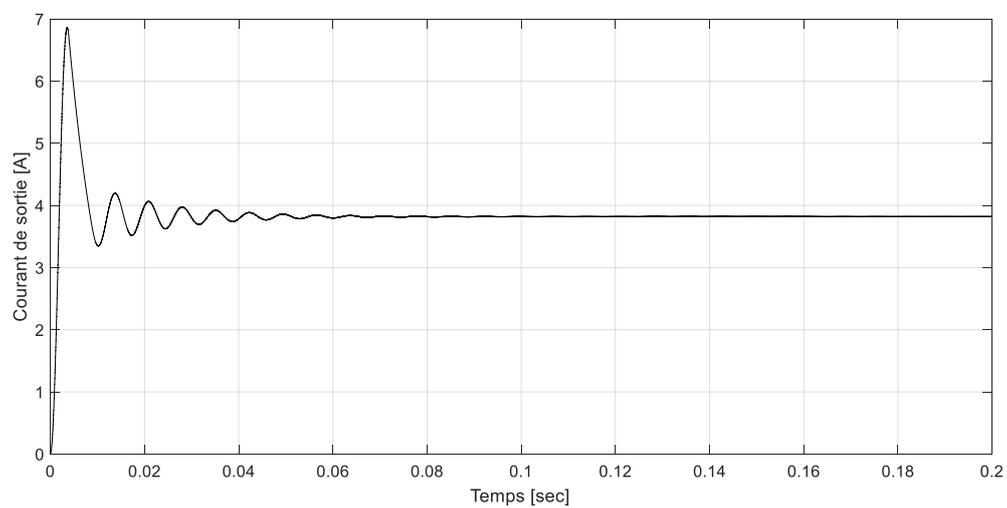


Figure 4.4 : Réponse du courant de sortie du convertisseur BOOST.

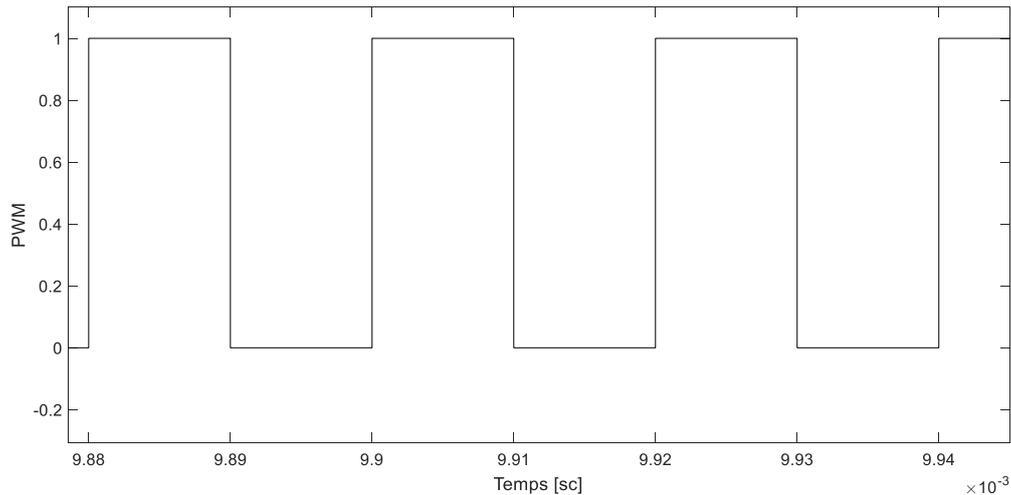


Figure 4.5 : Type de PWM pour la commande de l'IGBT.

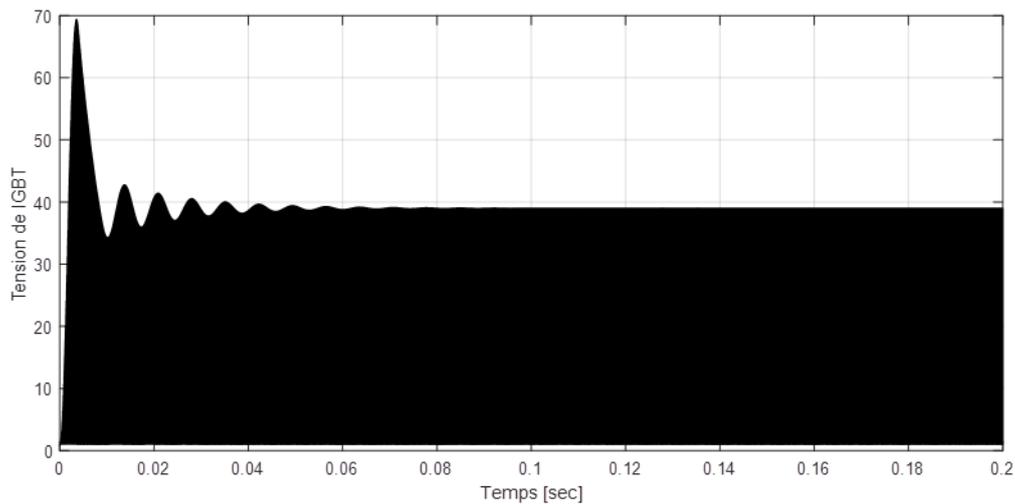


Figure 4.6 : Réponse de la tension aux bornes de l'IGBT.

Interprétation des résultats :

La figure 4.3 et 4.4 montrent respectivement le comportement du courant à l'entrée et à la sortie du convertisseur BOOST élévateur suite à une tension d'entrée $V_e = 10V$.

La figure 4.5 illustre le type de la MLI ou PWM choisie pour la commande de l'IGBT avec une fréquence égale à 5 KHz, et la figure 4.6 montre la tension aux bornes de l'IGBT.

4.3.3.2. Les résultats de simulation pour un (α et V_e) variables

Les résultats de simulation pour un rapport cyclique variable α de 0.1 – 0.99 et une tension d'entrée prise entre $V_e = 10 - 20$ Volts sont regroupés dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2 : Résultats de simulation pour un rapport cyclique variable et V_e variable.

Alpha (α)	V_{O1} ($V_i = 10$)	V_{O2} ($V_i = 13$)	V_{O3} ($V_i = 16$)	V_{O4} ($V_i = 20$)
0.1	10.21	13.54	16.86	21.34
0.2	11.45	15.19	18.95	23.95
0.3	13.08	17.36	21.67	27.39
0.4	15.2	20.19	25.21	31.87
0.5	18.24	24.24	30.27	38.28
0.6	22.7	30.19	37.7	47.68
0.7	30.29	40.3	50.36	63.74
0.8	45.12	60.06	75.08	95
0.9	90.36	120.4	150.5	190.5
0.99	450	600	750	950

La figure suivante montre la variation de la tension de sortie en fonction de la variation du rapport cyclique α , on remarque que l'augmentation du rapport cyclique α provoque une augmentation de la tension de sortie.

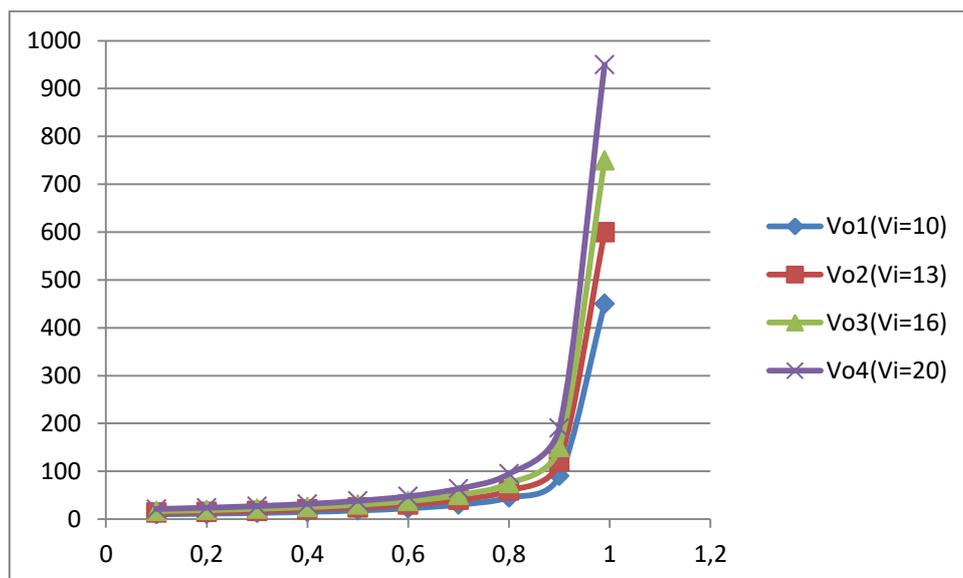


Figure 4.7: Réponse de la tension de sortie en fonction du rapport cyclique.

4.3.4. Choix du pas de simulation

Pour maintenir la valeur de la tension de sortie fixe à 50 Volts, et pour une tension d'entrée quelconque, nous avons proposés 4 pas pour la variation du rapport cyclique sur le convertisseur BOOST avec la commande state flow :

Commande par un pas fixe (0,005) :

L'organigramme suivant montre la commande stat flow avec un pas fixe.

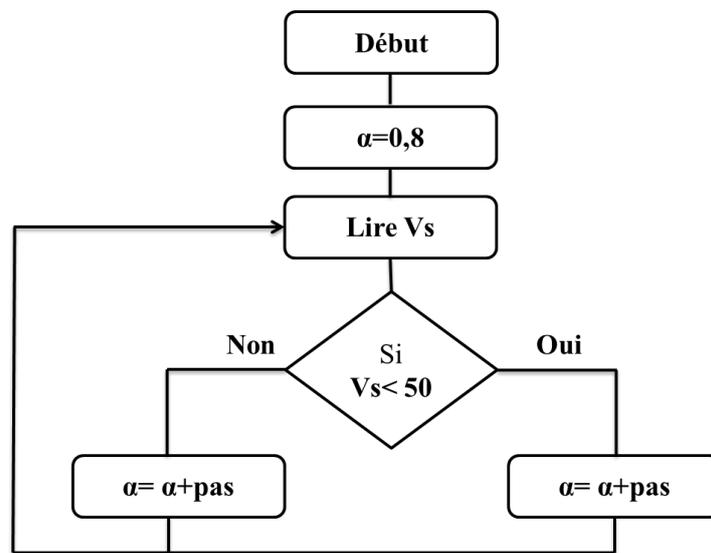


Figure 4.8 : L'organigramme de la commande stat flow avec un pas fixe.

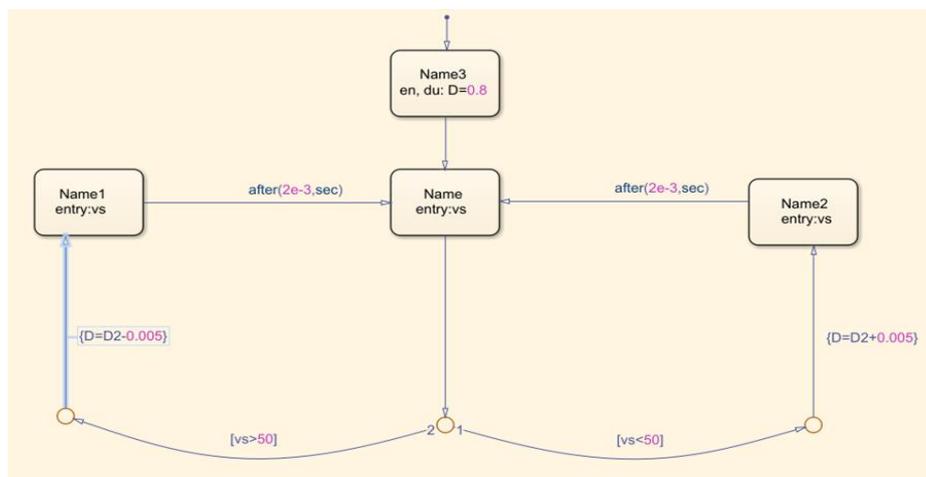


Figure 4.9 : Le programme graphique de la commande stat flow avec un pas de 0.005.

Commande par un pas fixe (0,001) :

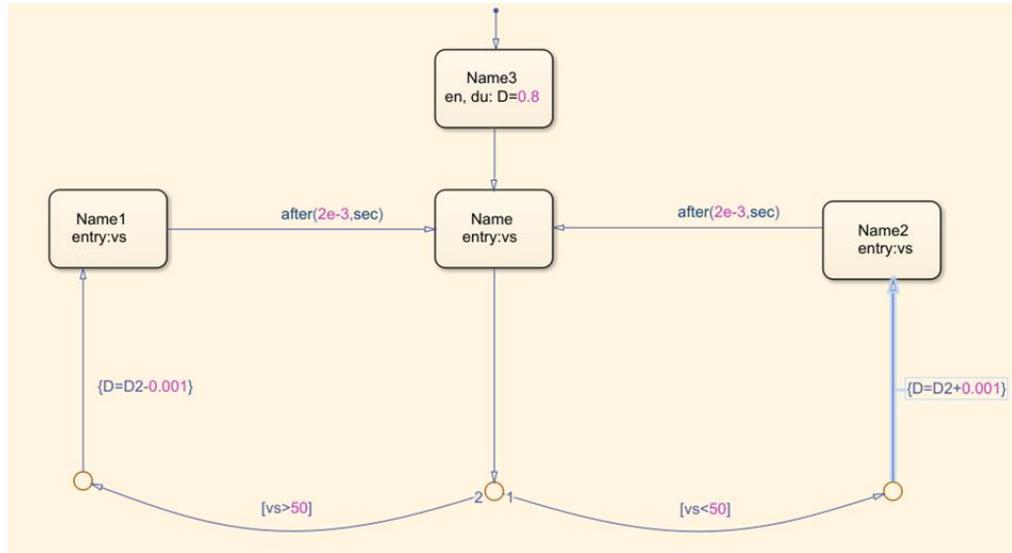


Figure 4.10 : Le programme graphique de la commande stat flow avec un pas fixe de 0.001.

Commande par un pas fixe (0,0004) :

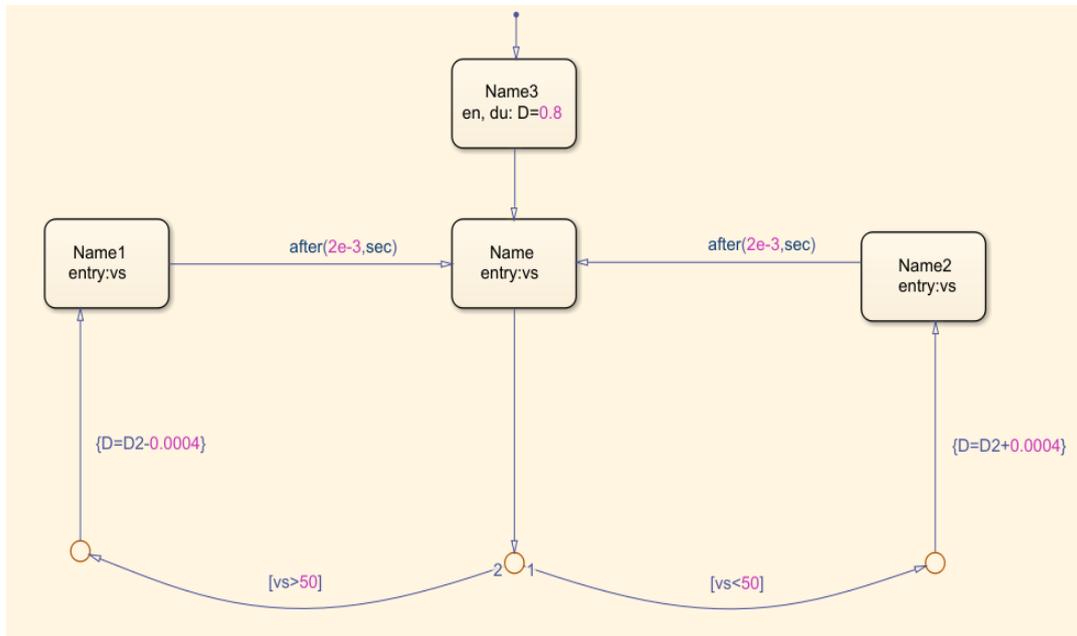


Figure 4.11 : Le programme graphique de la commande stat flow avec un pas fixe de 0.0004.

Commande par un pas variable :

L'organigramme suivant montre la commande stat flow avec un pas variable.

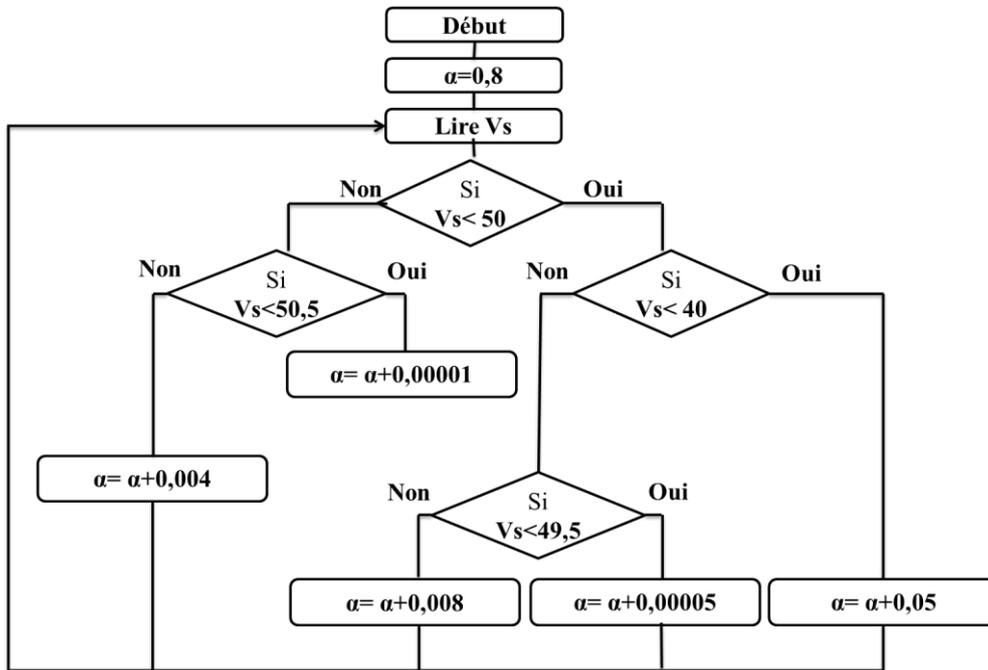


Figure 4.12 : L'organigramme de la commande stat flow avec un pas variable.

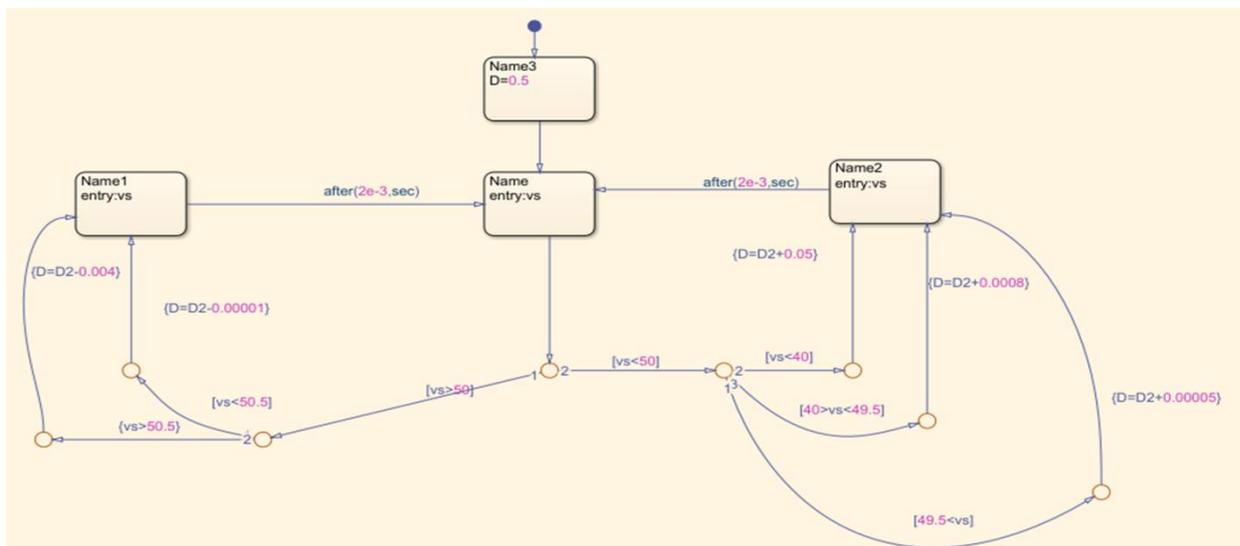


Figure 4.13 : Le programme graphique de la commande stat flow avec un pas variable.

4.4. Simulation du convertisseur BOOST avec les différents pas

La figure suivante montre le schéma d'un convertisseur BOOST commandé par state flow avec des pas fixes et un pas variable dans l'environnement Matlab/Simulink.

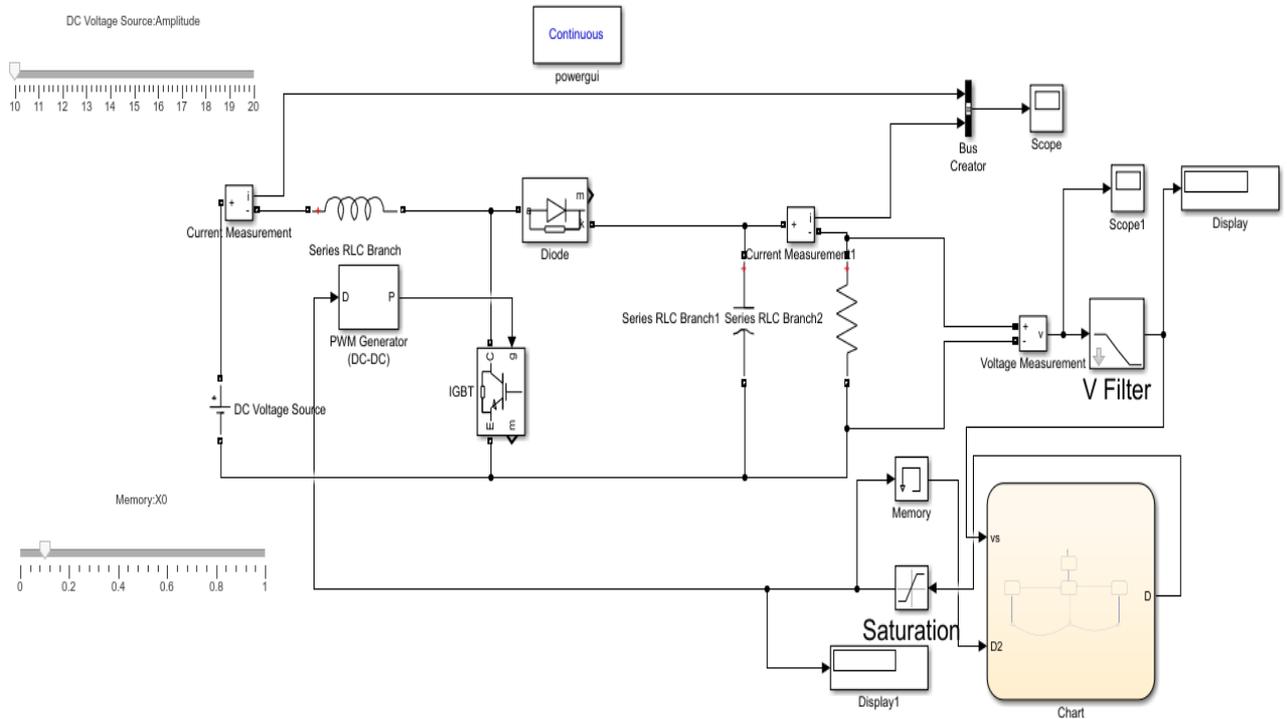


Figure 4.14 : Modèle de la simulation du convertisseur avec la commande stat flow.

4.4.1. Résultats de la simulation pour un modèle globale

Pour une tension d'entrée $V_e = 10\text{ V}$ avec différents pas :

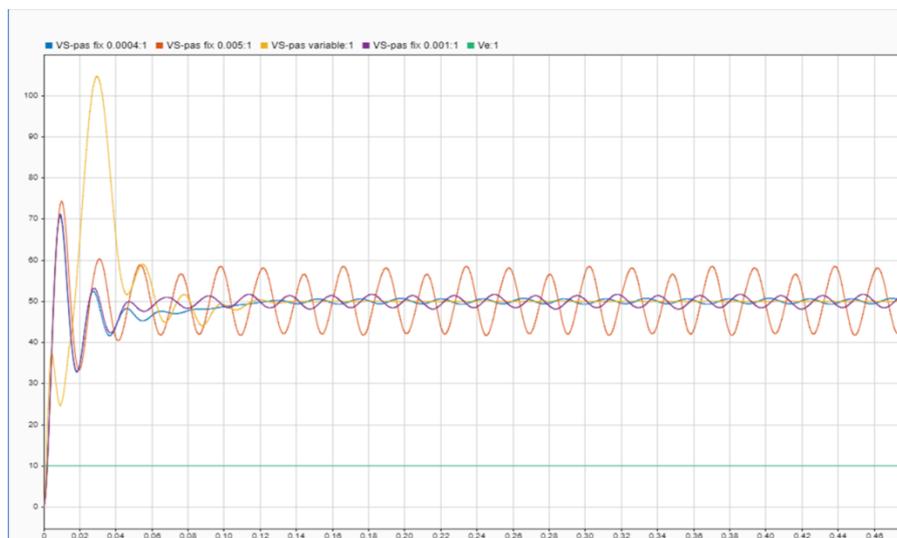


Figure 4.15 : Réponse de la tension de sortie V_S en fonction des différents pas.

Tableau 4.3: Résultats de la tension de sortie en fonction de la variation du pas.

Alpha (α)	temps de correction [sec]	Ondulation de la tension ΔV_s [V]	V_s max [V]	V_s min [V]
Pas fixe 0.005	0.092	16.91	58.55	41.64
Pas fixe 0.001	0.086	3.69	51.79	48.10
Pas fixe 0.0004	0.153	1.54	50.79	49.25
Variable	0.162	0.63	50.12	49.49

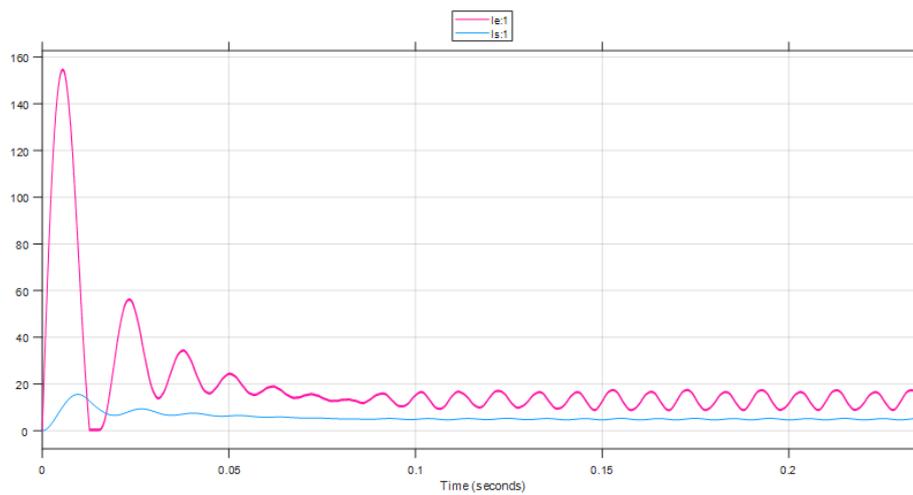


Figure 4.16 : Réponse du Courant d'entrée et de sortie pour un pas = 0.005 fixe.

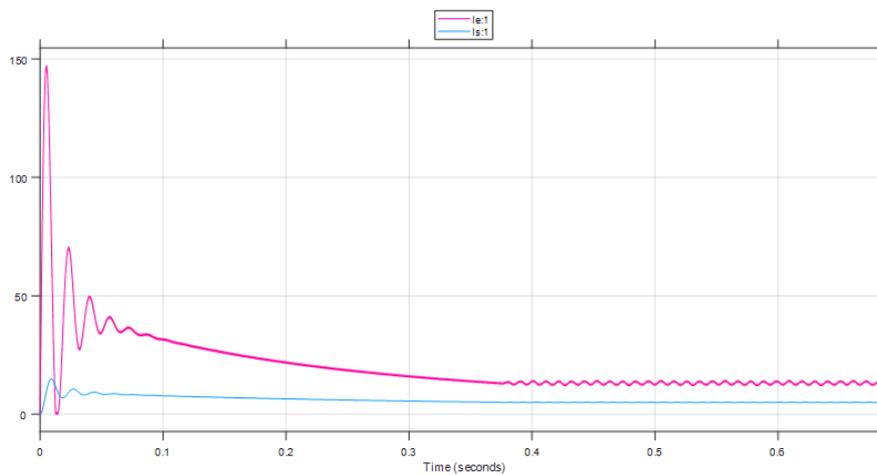


Figure 4.17 : Réponse du Courant d'entrée et de sortie pour un pas = 0.001 fixe.

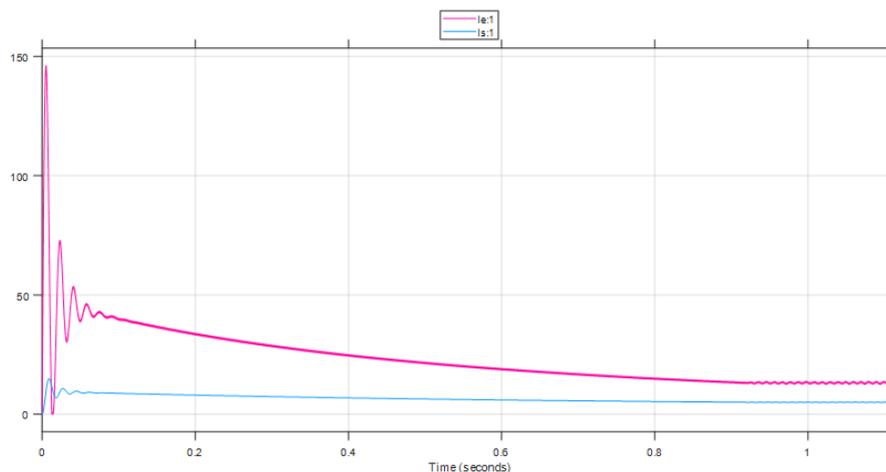


Figure 4.18 : Réponse du Courant d’entrée et de sortie pour un pas = 0.0004 fixe.

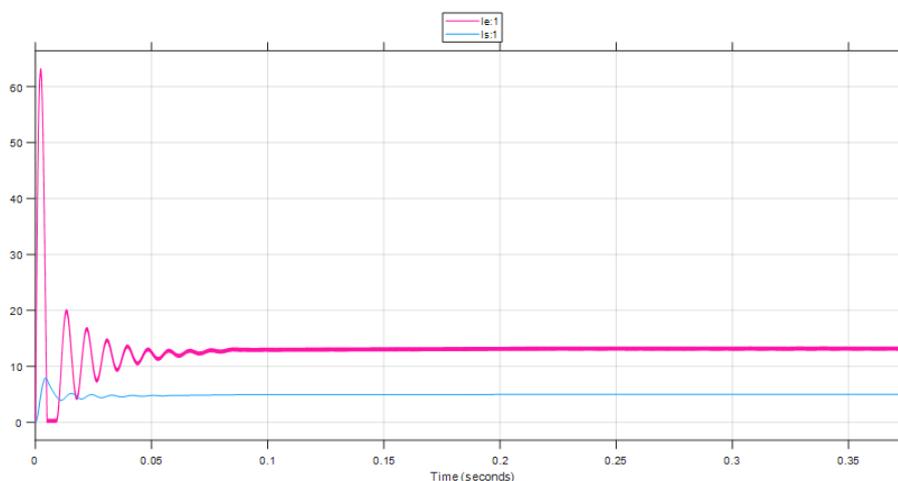


Figure 4.19 : Réponse du Courant d’entrée et de sortie pour un pas variable.

Pour une tension d’entrée $V_e = 15 V$ avec différents pas

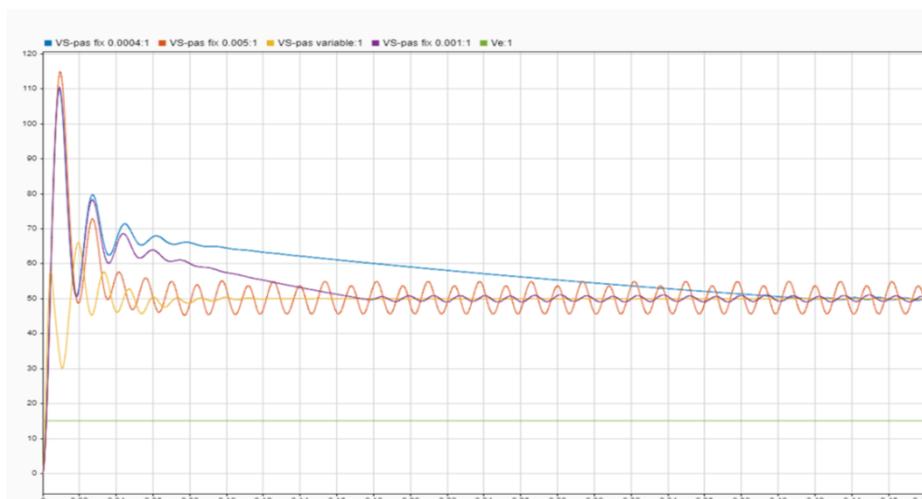
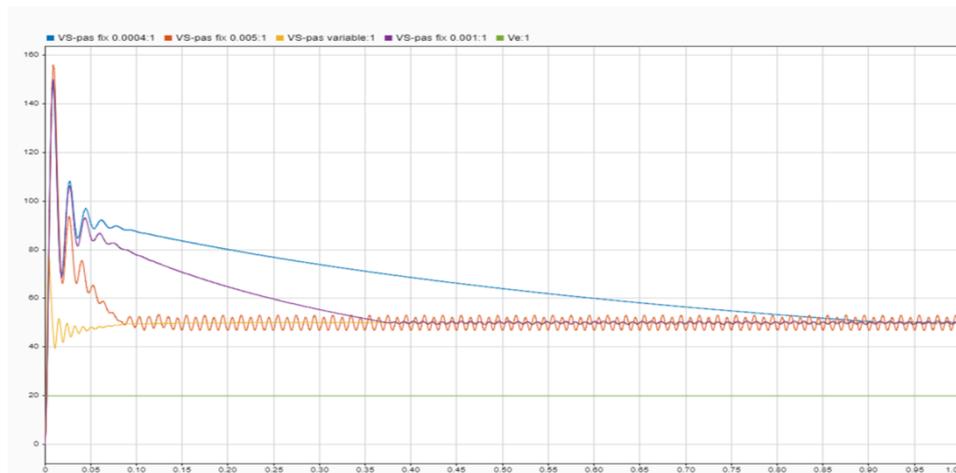


Figure 4.20 : Réponse de la tension de sortie V_S en fonction des différents pas.

Tableau 4.4 : Résultats de la tension de sortie en fonction de la variation du pas.

Alpha (α)	temps de correction (s)	Ondulation de tension V_s (v)	V_s max (v)	V_s min (v)
Pas fixe 0.005	0.082	9.43	55	45.57
Pas fixe 0.001	0.197	2.15	51.17	49.02
Pas fixe 0.0004	0.453	0.9	50.41	49.51
Variable	0.124	0.12	50.07	49.95

Pour une tension d'entrée $V_e = 20$ V

**Figure 4.21 :** Réponse de la tension de sortie V_s en fonction des différents pas.**Tableau 4.5 :** Résultats de la tension de sortie en fonction de la variation du pas.

Alpha (α)	temps de correction (s)	Ondulation de tension V_s (v)	V_s max (v)	V_s min (v)
Pas fixe 0.005	0.182	6.28	53.11	46.83
Pas fixe 0.001	0.396	1.17	50.73	49.55
Pas fixe 0.0004	0.922	0.6	50.26	49.66
Variable	0.092	0.1	50.06	49.96

Interprétation des résultats de simulation:

Les figures 4.15, 4.20 et 4.21 représentent les tensions de sortie de hacheur élévateur en fonction du temps avec la variation de la tension d'entrée entre [10, 15 et 20] Volts, nous

avons variés le pas du rapport cyclique chaque fois avec des valeurs fixes de [0.005, 0.001, 0.0004] et un pas variable.

On remarque pour les pas fixes que si le pas est important l'ondulation augmente. Et pour le cas du pas variable on constate que la variation ΔV_s est minime, ce qui nous conduit à dire dans ce cas que le pas variable nous donne des résultats satisfaisantes pour la simulation de notre convertisseur BOOST.

4.5. Conclusion

Dans ce présent chapitre, nous avons fait la synthèse de la commande du convertisseur BOOST avec le contrôleur State Flow avec un choix multiple des différents pas de simulations.

Nous avons remarqué que dans le cas où le système est contrôlé par un pas variable donne des ondulations moins importantes dans le régime permanent de la réponse de la tension de sortie du convertisseur BOOST élévateur.

Conclusion générale

Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire concerne une application des plus actuelles des énergies renouvelables, celle de l'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque. Une meilleure rentabilité de ce système à énergies renouvelables implique forcément un meilleur conditionnement, donc l'adaptation.

L'énergie photovoltaïque est produite à partir du rayonnement solaire, via un composant électronique : la cellule photovoltaïque. La tension délivrée par le panneau solaire n'est pas constante car elle dépend de l'ensoleillement. Donc il est nécessaire de prévoir un régulateur de charge.

Dans beaucoup d'applications industrielles, on a besoin de convertir une tension continue fixe en une tension continue variable. Un hacheur convertit directement de DC à DC. Il peut être utilisé comme un convertisseur Continu-Continu, abaisseur ou élévateur.

Ce mémoire a été consacré à l'étude et la réalisation d'un convertisseur DC/DC élévateur de tension type BOOST intégré dans une chaîne photovoltaïque commandé par la commande STATE FLOW afin de régler la tension à une certaine valeur fixée par l'utilisateur.

En première partie, nous avons présenté les différents types des énergies renouvelables (éolienne, géothermique, biomasse, hydraulique, solaire...)

En deuxième partie, nous avons étudié le Principe de la conversion photovoltaïque où on a présenté les cellules PV, et le modèle des différents éléments constitutif (module, générateur,...) ainsi que les différentes technologies et différents types de système PV.

Dans la troisième partie, une étude est faite pour quelques types de convertisseurs statiques utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Comme le hacheur dévolteur, le hacheur survolteur, le hacheur mixte (dévolteur-survolteur), le hacheur SPEC et le hacheur CUK, notre choix est fixé sur le hacheur de type BOOST vu qu'il représente des avantages comparées aux autres convertisseurs.

Finalement, nous avons présenté le fonctionnement du hacheur DC-DC (BOOST) commandé par la commande state flow, les résultats de simulations montrent l'efficacité de la méthode de commande choisie pour la régulation de la tension de sortie du convertisseur BOOST avec un pas de commande variable.

Pour la continuité de ce travail, il nous vient à l'esprit de définir les axes de recherches qui sont, à notre avis, prometteurs pour le développement de de système photovoltaïque:

1. Modélisation et commande d'un système photovoltaïque à base d'un régulateur BOOST élévateur

1. Modélisation et commande d'un système photovoltaïque à base d'un régulateur BOOST élévateur couplé au réseau électrique.

2. Commande dynamique et gestion optimale de l'énergie dans un site rural.

3. Application de nouvelles commandes pour l'énergie renouvelable.