

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEURE ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITÉ MOHAMED KHIDER - BISKRA
FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE- ÉLECTROTECHNIQUE
FILIÈRE :ÉLECTROTECHNIQUE
OPTION :COMMANDE ÉLECTRIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Optimisation de fonctionnement d'un électrolyseur à travers un convertisseur DC/DC

Présentée par : RAHALI Imane

Soutenu le : 5/6/2017

Devant le jury composé de :

Pr. BAHRI Mebarek	Professeur	Président
Dr. SAADI Aicha	MCB	Encadreur
Dr. KIOR Brahim	MAA	Examinateur

Année Universitaire : 2016/2017

Dédicaces

À

mon très cher père,

ma très chère mère,

mes neveu koussai et djihad,

mes chères soeurs,

toute ma famille,

tous mes amies,

*Et à tous la promotion d'électrotechnique
surtout groupe commande 2016/2017, Messaouda, Messaoud, Ilyess, Ahmed,
Lazhar, Taki, Akram, Basil, Oukla, Akram, Sami, Amar, Oussama, Youcef,
Anouar, Mohamed lamine, Abdelmalek, Fateh et Hakim.*

je dédie ce modeste travail.

Remerciements

Avant toute chose, je remercie dieu qu'il a donné le tout puissant, la force, la volonté et le courage pour accomplir ce modeste travail.

Je voudrais exprimer toute gratitude à mon encadreur de thèse Docteur Saadi Aicha pour, sa patience, son soutien et ses encouragements et aussi ses conseils, les efforts et les aides qu'elle a donnée pendant tout au long de ce travail.

Toutes nos expressions de gratitude et de reconnaissance vont vers les membres du jury. Je remercie également à l'ensemble des enseignants du département électrotechnique pour la formation qu'ils nous ont donné notre cycle d'étude.

Je voudrais remercier vivement Dr. Bahri Mebarek, pour avoir accepté d'en présider et le jury Dr. Kior Brahim pour son évaluation de mon travail de thèse.

Enfin, je remercie, avec toute la suprême sincérité tout ceux qui ont aidé de près ou de loin pour terminer et réaliser mon projet de fin d'étude.

ملخص

تأتي هذه الدراسة أساساً في إطار شرح مبدأ اشتغال المحلل الكهربائي من نوع (غشاء البلمير الكهربائي)، بسبب الثمن الباهض جداً للهيدروجين والزيادة في استهلاك الهيدروجين خاصة كوقود. و لحل هذه المشاكل إجراءات مناسبة مصممة لذلك. واحدة من هذه الإجراءات المستعملة في إنتاج الهيدروجين؛ هو التحليل الكهربائي للماء غشاء البلمير الكهربائي. حالياً، هذا الأخير يمثل 4% من إنتاجية الهيدروجين العالمي. في هذا الإطار أيضاً هذه الدراسة تسمح بقياس وتحليل لغرض معرفة أبعاد و خصائص المحلل الكهربائي واللوح الضوئي الذي يغذي المحلل الكهربائي لغرض إنتاج الهيدروجين. العمل التجريبي أجري على لوحة التجارب لتحديد معاملات المحلل الكهربائي واللوح الضوئي، وفقاً للبيانات التقنية للشركة المصنعة. والهدف الرئيسي من هذه الأطروحة هو تحسين اشتغال المحلل الكهربائي عن طريق محول الجهد مستمر- مستمر. تحسين الاستطاعة القصوى المنتجة من طرف اللوح الضوئي لغرض حماية اللوح الضوئي، ضمان أطول مدة حياة، أو بعبارة أخرى الابتعاد ما أمكن عن شيخوخة اللوح الضوئي من جهة ورفع كمية الهيدروجين والأكسجين المنتج من طرف المحلل الكهربائي من جهة أخرى.

كلمات مفتاحية :

محلل كهربائي غشاء البلمير الكهربائي، اللوح الضوئي، نمذجة، محول جهد مستمر – مستمر، خوارزمية تتبع الطاقة القصوى.

Résumé

CETTE étude s'inscrit principalement dans le cadre d'expliquer le principe de fonctionnement d'un électrolyseur de type PEM (Polymère Electrolyte Membrane). En raison du coût trop élevé d'hydrogène et aussi l'augmentation de sa consommation et surtout en tant qu'un combustible, et afin de résoudre ces différents problèmes, des procédures adéquates ont été conçues pour cela, l'une des ces procédures utilisées pour la production de l'hydrogène c'est : l'électrolyse de l'eau PEM. Actuellement, ce dernier représente près de 4 % de la production d'hydrogène mondial. Dans ce contexte, cette étude a permis de faire des mesures et analyse pour connaître les dimensionnements et les caractéristiques d'électrolyseur et de panneau photovoltaïque qui l'alimente pour la production de l'hydrogène. Le travail expérimental a été fait sur une maquette pour l'identification des paramètres d'un électrolyseur et d'un panneau en accord avec les données techniques de la fabrication. L'objectif principal de ce travail de thèse est l'optimisation de fonctionnement d'un électrolyseur à travers un convertisseur DC-DC. L'optimisation de la puissance maximale délivrée par le panneau photovoltaïque pour sa protection, d'assurer une longue durée de vie, autrement dit de s'éloigner du vieillissement du panneau d'une part et d'augmenter le débit d'hydrogène et d'oxygène produits par un électrolyseur d'une autre part.

Mots clés :

Électrolyseur PEM, Panneau photovoltaïque PV, Modélisation, Convertisseur DC-DC, Algorithme d'MPPT.

Abstract

THE main reason for this study is to explain the operating principle of an Electrolyser PEM model (Polymer Electrolyte Membrane), due to the high cost of hydrogen and also the increase in its consumption and especially as a fuel, and in order to solve these various problems, there are adequate procedures have been used for this, one of these procedures used for the production of hydrogen is : electrolyser of water PEM. Currently, it accounts for nearly 4% of global hydrogen production. In this context, this study allows us to make measurements and analysis to know the dimension and characteristics of the electrolyser and a photovoltaic panel which supplies it for the production of hydrogen. The experimental work was done on a model for the identification of the parameters of an electrolyser and of a panel in agreement with the technical data of the manufacture. And the main objective of this thesis is to optimize the operation of an electrolyser through a DC-DC converter. Optimization of the maximum power delivered by the photovoltaic panel for its protection, to ensure a long service life, in other words to move away from the aging of the panel on the one hand and increase the flow of hydrogen and oxygen produced by an electrolyser on the other hand.

keywords :

PEM electrolyser, PV Solar panel, Modelisation, DC-DC converter, MPPT algorithm.

Optimisation du fonctionnement d'un électrolyseur
à travers un convertisseur DC/DC

RAHALI Imane

13 juin 2017

Table des matières

Table des matières	I
Liste des figures	V
Liste des tables	IX
Introduction générale	1
1 Généralité sur l'électrolyseur PEM	3
1.1 Introduction	3
1.2 L'électrolyseur	4
1.2.1 Historique	4
1.2.2 Conceptions d'électrolyseurs	5
1.2.2.1 Concept unipolaire	5
1.2.2.2 Concept bipolaire	6
1.2.3 Les différents types d'électrolyseurs	7
1.3 Électrolyseur PEM(Polymère Électrolyte Membrane)	8
1.3.1 Constitutions d'un électrolyseur PEM	8
1.3.2 Principe de fonctionnement d'un électrolyseur PEM	8
1.3.3 Les avantages et les inconvénients d'un électrolyseur PEM	9
1.3.3.1 Les avantages d'un électrolyseur PEM	9
1.3.3.2 Les inconvénients d'un électrolyseur PEM	10
1.4 Les majeures techniques de production d'hydrogène	10
1.4.1 Production d'hydrogène à partir de l'énergie fossile	11
1.4.2 Production d'hydrogène à partir de l'énergie nucléaire	12
1.4.3 Production d'hydrogène à partir de l'énergie renouvelable	12

1.4.4	Production d'hydrogène à partir de l'électrolyse de l'eau . . .	12
1.5	Les modes de stockage d'hydrogène	12
1.5.1	Stockage d'hydrogène sous pression (faible et élevée)	13
1.5.1.1	La compression du gaz	13
1.5.1.2	Le refroidissement du gaz	13
1.5.1.3	Le réservoir	13
1.5.2	Stockage d'hydrogène sous forme liquide	14
1.5.3	Stockage d'hydrogène par hydrure métallique	14
1.6	Aspects de sécurité avec l'hydrogène en temps que combustible	14
1.7	Conclusion	15
2	Généralité sur l'énergie photovoltaïque	16
2.1	Introduction	16
2.2	Les principaux composants d'un système PV	16
2.2.1	Générateur photovoltaïque	17
2.2.2	Panneau photovoltaïque	18
2.2.3	Cellule photovoltaïque (photopile)	18
2.2.3.1	Cellule mono-cristalline	19
2.2.3.2	Cellule multicristalline (poly-cristalline)	20
2.2.3.3	Cellule amorphe	20
2.3	Association des cellules photovoltaïques	20
2.3.1	Association en série	21
2.3.2	Association en parallèle	22
2.3.3	Association en série-parallèle	23
2.4	Conclusion	24
3	Les convertisseurs DC-DC	25
3.1	Introduction	25
3.2	Les convertisseurs DC-DC	26
3.3	Réversibilité et non réversibilité d'un convertisseur DC-DC	26
3.4	Les interrupteurs utilisés	27
3.5	Les différents types d'un convertisseur DC-DC	28
3.5.1	Convertisseurs continu-continu non isolé	28

3.5.2	Convertisseurs continu-continu isolés	28
3.6	Les convertisseurs DC-DC non isolés	29
3.6.1	Convertisseur dévolteur (Buck)	29
3.6.2	Convertisseur survolteur (Boost)	30
3.6.3	Convertisseur dévolteur-survolteur (Buck-Boost)	31
3.6.3.1	Structure	32
3.6.3.2	Le principe de fonctionnement	32
3.6.3.3	Les avantages et les inconvénients	36
3.7	Les convertisseurs DC-DC isolés	37
3.7.1	Convertisseur Zeta	37
3.7.1.1	Structure	37
3.7.1.2	Le principe de fonctionnement	37
3.7.1.3	Les avantages et les inconvénients	41
3.8	Conclusion	41
4	Optimisation de fonctionnement d'un électrolyseur PEM	43
4.1	Introduction	43
4.2	Convertisseur Buck-Boost	44
4.2.1	Fonctionnement Boost : $\alpha = 0,65 \succ 0,5$	44
4.2.2	Fonctionnement Buck : $\alpha = 0,35 \prec 0,5$	47
4.3	Convertisseur Zeta	50
4.3.1	Fonctionnement Boost : $\alpha = 0,65 \succ 0,5$	50
4.3.2	Fonctionnement Buck : $\alpha = 0,35 \prec 0,5$	53
4.4	Techniques de la recherche du point de puissance maximale	57
4.4.1	Algorithme perturbation et observation (P et O)	58
4.4.2	Couplage direct (panneau-électrolyseur PEM)	59
4.4.3	Couplage d'un système complet sans optimisation	61
4.4.4	Couplage d'un système complet avec optimisation	63
4.5	Conclusion	64
5	Validation expérimentale	66
5.1	Introduction	66
5.2	Description de maquette	67

5.2.1	L'électrolyseur PEM	68
5.2.2	Panneau solaire	69
5.2.2.1	Modèle équivalent d'une cellule PV à une diode	71
5.2.2.2	L'influence de la température et de l'éclairement	73
5.2.3	Production d'hydrogène à partir de l'électrolyse de l'eau	76
5.2.4	Production d'électricité à partir d'hydrogène	78
5.3	Conclusion	80
	Conclusion générale	81
	AnnexeA	83
	AnnexeB	84
	AnnexeC	85
	Bibliographie	89

Liste des figures

1.1	Le processus d'électrolyse découvert par Nicholson et Carlisle, [2].	4
1.2	L'électrolyseur unipolaire, [2].	6
1.3	L'électrolyseur bipolaire, [2].	6
1.4	La structure de base d'un électrolyseur de type PEM, [1].	9
1.5	Principales origines de l'hydrogène produit aujourd'hui dans le monde, [7].	11
2.1	Les principaux composants d'un système photovoltaïque, [7].	17
2.2	Description d'une cellule photovoltaïque ou photopile, [7].	19
2.3	Les technologies de cellule photovoltaïque, [12].	19
2.4	Les caractéristiques d'une association série de (N_s) cellules, [14].	21
2.5	Les caractéristiques d'une association parallèle de (N_p) cellules, [14].	22
2.6	(a) : Architecture classique d'un panneau solaire PV avec diodes de protections (b) : défaillance d'une cellule du module PV et activation de la diode (by-pass) mise en évidence du courant de circulation I_{pv} , [14].	23
3.1	structure d'un convertisseur statique continu-continu, [16].	26
3.2	Réversibilité et non réversibilité d'un convertisseur DC-DC, [17].	26
3.3	Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur (Buck).	29
3.4	Schéma de principe d'un convertisseur survolteur (Boost).	30
3.5	Schéma de principe d'un convertisseur Buck-Boost.	32
3.6	Le circuit équivalent de fonctionnement d'un convertisseur Buck-Boost en phase 1.	33

3.7	Le circuit équivalent de fonctionnement d'un convertisseur Buck-Boost en phase 2.	34
3.8	Forme d'onde d'un convertisseur Buck-Boost, [22].	35
3.9	Schéma de principe d'un convertisseur Zeta.	37
3.10	Le circuit équivalent de fonctionnement d'un convertisseur Zeta en phase 1.	38
3.11	Le circuit équivalent de fonctionnement d'un convertisseur Zeta en phase 2.	39
3.12	Forme d'onde d'un convertisseur Zeta, [24].	40
4.1	Les allures des tensions fonctionnement Boost.	44
4.2	Les allures de tension et de courant du charge fonctionnement Boost.	45
4.3	Les allures de courant et de tension du diode fonctionnement Boost.	45
4.4	Les allures de courant d'inductance et du capacité fonctionnement Boost.	46
4.5	Les allures de courant et de tension d'IGBT fonctionnement Boost.	46
4.6	Les allures des tensions fonctionnement Buck.	47
4.7	Les allures de tension et de courant du charge fonctionnement Buck.	48
4.8	Les allures de courant et de tension du diode fonctionnement Buck.	48
4.9	Les allures de courant d'inductance et du capacité fonctionnement Buck.	49
4.10	Les allures de courant et de tension d'IGBT fonctionnement Buck.	49
4.11	Les allures des tensions fonctionnement Boost.	50
4.12	Les allures de tension et de courant du charge fonctionnement Boost.	51
4.13	Les allures de courant et de tension du diode fonctionnement Boost.	51
4.14	Les allures des courants des inductances fonctionnement Boost.	52
4.15	Les allures des courants des capacités fonctionnement Boost.	52
4.16	les allures de courant et de tension d'IGBT fonctionnement Boost.	53
4.17	Les allures des tensions fonctionnement Buck.	54
4.18	Les allures de tension et de courant du charge fonctionnement Buck.	54
4.19	Les allures de courant et de tension du diode fonctionnement Buck.	55
4.20	Les allures des courants des inductances fonctionnement Buck.	55

4.21	Les allures des courants des capacités fonctionnement Buck.	56
4.22	Les allures de courant et de tension d'IGBT fonctionnement Buck. . .	56
4.23	La caractéristique (P-V) du panneau solaire, [25].	58
4.24	Algorithme de perturbation et de l'observation (P et O).	59
4.25	La caractéristique (I-V) du panneau solaire.	60
4.26	La caractéristique (P-V) du panneau solaire.	61
4.27	La caractéristique (I-V) du panneau solaire.	62
4.28	La caractéristique (P-V) du panneau solaire.	62
4.29	La caractéristique (I-V) du panneau solaire.	63
4.30	La caractéristique (P-V) du panneau solaire.	64
5.1	Diagramme du cycle d'hydrogène renouvelable, [2].	67
5.2	Maquette pédagogique Horizon.	68
5.3	L'électrolyseur de type PEM	68
5.4	Panneau solaire.	70
5.5	La caractéristique (P-V) expérimentale du panneau solaire.	71
5.6	La caractéristique (I-V) expérimentale du panneau solaire.	71
5.7	Modèle équivalent d'une cellule PV à une diode.	72
5.8	Les caractéristiques (I-V) expérimentaux et simulations du panneau. .	73
5.9	Les caractéristiques (P-V) expérimentaux et simulations du panneau.	73
5.10	L'effet de l'éclairement sur la caractéristique (I-V) du panneau.	74
5.11	L'effet de l'éclairement sur la caractéristique (P-V) du panneau. . . .	74
5.12	L'effet de la température sur la caractéristique (I-V) du panneau. . .	75
5.13	L'effet de la température sur la caractéristique (P-V) du panneau. . .	75
5.14	Variation du courant de court-circuit I_{cc} en fonction de l'éclairement.	76
5.15	Variation du tension de circuit-ouvert V_{co} en fonction de l'éclairement.	76
5.16	L'électrolyse de l'eau à partir de l'énergie solaire.	77
5.17	L'électrolyseur alimente une charge fixe (LED).	79
5.18	La caractéristique (V-I) d'électrolyseur alimente une charge fixe (fonc- tionnement pile).	79
5.19	Schéma bloc d'un convertisseur Buck-Boost.	83
5.20	Schéma bloc d'un convertisseur Zeta.	84

5.21	Schéma bloc d'un couplage direct (panneau PV- électrolyseur PEM).	85
5.22	Schéma bloc d'un couplage indirect(panneau PV-convertisseur DC- DC-électrolyseur PEM) sans optimisation.	86
5.23	Le schéma bloc d'algorithme Perturbe et Observe (P et O).	87
5.24	Schéma bloc d'un couplage indirect (panneau PV-convertisseur DC- DC-électrolyseur PEM) avec optimisation.	88

Liste des tables

1.1	Les différents types de l'électrolyseur, [4].	7
3.1	Les principales caractéristiques d'un convertisseur Buck, [20] et [21]. .	30
3.2	Les principales caractéristiques d'un convertisseur Boost, [20] et [21].	31
3.3	Les principales caractéristiques d'un convertisseur Buck-Boost, [20] et [21].	36
3.4	Les avantages et les inconvénients d'un convertisseur Buck-Boost, [23].	36
3.5	Les principales caractéristiques d'un convertisseur Zeta, [20] et [21]. .	41
3.6	Les avantages et les inconvénients d'un convertisseur Zeta, [23]. . . .	41
5.1	Les caractéristiques de l'électrolyseur identifiés	69
5.2	Les caractéristiques du panneau solaire identifiés.	70
5.3	Les caractéristiques de l'électrolyseur.	78
..		

Introduction générale

Les ressources renouvelables présentent peu de dangers humains et écologiques. Elles se présentent sous de nombreuses formes, certaines étant naturellement stockables (comme la biomasse ou les barrages hydroélectriques), et d'autres non, en particulier les sources éoliennes et photovoltaïques. L'hydrogène est inodore, incolore, non polluant et non toxique ; ne se trouve dans la nature qu'à l'état combiné, surtout dans l'eau. Dans le contexte énergétique actuel, les propriétés physique et environnementale de l'hydrogène font de lui un vecteur énergétique de qualité en association avec l'électricité, donc il est nécessaire de le produire. L'électrolyse de l'eau pour la production de l'hydrogène est le procédé le plus répandu et le plus prisé. Les grands avantages d'électrolyseur sont : un rendement élevé, économise le temps et l'hydrogène produit par l'électrolyseur est pure et non polluant si on alimente ce dernier par électricité d'origine renouvelable tel que l'énergie solaire ou bien l'énergie éolienne. Les grands inconvénients d'électrolyseur sont : le coût de membrane est cher et il nécessite l'énergie électrique pour la production d'hydrogène.

Dans notre travail nous nous sommes intéressés à l'optimisation de fonctionnement d'un électrolyseur «Polymer Electrolyte Membrane» (PEM) qui produit l'hydrogène à partir d'une source solaire.

Ce travail a été organisé de façon complémentaire. Il est ainsi structuré en cinq chapitres :

- Le premier chapitre, parle d'une façon générale sur l'électrolyseur. Nous décrivons l'histoire d'électrolyseur et leurs conceptions, après nous indiquons les différents types d'électrolyseur, nous intéressons plus particulièrement à l'électrolyseur PEM leur structure, principe de fonctionnement et aussi les avantages et les inconvénients, ainsi que les majeurs techniques de production

d'hydrogène, stockage et sécurité.

- Le deuxième chapitre, parle sur l'énergie photovoltaïque (PV), nous donnons une rappelle générale sur les principaux composants d'un système PV. Puis nous présentons les technologies les plus utilisés et aussi les associations des cellules photovoltaïques.
- Le troisième chapitre, est consacré aux les convertisseurs DC-DC, après quelques rappelles sur les convertisseurs DC-DC, nous intéressons d'explique le fonctionnement de deux structures, une à stockage inductif (Buck-Boost) et l'autre à stockage capacitif (Zeta).
- Le quatrième chapitre, est consacré aux résultats de simulation de deux convertisseurs précédents, nous réalisons sous l'environnement MATLAB/Simulink le convertisseur Buck-Boost et le convertisseur Zeta, puis nous obtenons les résultats et nous comparons les résultats de simulation avec les résultats théoriques. Puis nous appliquons la méthode «Maximum Power Point Tracking» (MPPT) pour suivi le point de puissance maximale, nous étudions l'algorithme de technique de poursuite de point de puissance maximal et le choix du convertisseur (Buck-Boost), nous choisissons le convertisseur (Buck-Boost) pour facilité la tache de développement un modèle de recherche d'MPPT en Simulink. La simulation du modèle Simulink d'MPPT assemblé avec le panneau photovoltaïque pour l'algorithme «Perturb and Observe» (P et O).
- Le cinquième chapitre, est consacré à la validation expérimentale et bien déterminée a été établie sur la maquette pédagogique de la marque Horizon pour l'identification des paramètres d'un électrolyseur et d'un panneau solaire. Cette thèse s'achève par une conclusion générale et quelques perspectives pouvant s'inscrire à la suite de ce travail, ainsi que quelques annexes.

Chapitre 1

Généralité sur l'électrolyseur PEM

1.1 Introduction

Les électrolyseurs sont des dispositifs électrochimiques qui permettent de transformer directement l'énergie électrique en énergie chimique. Ils utilisent l'électricité pour décomposer l'eau (H_2O) en hydrogène (H_2) et oxygène (O_2). L'électrolyse de l'eau est une réaction «d'oxydo-réduction», il s'agit d'un processus simple qui ne requiert aucune pièce en mouvement. Il est très fiable et peut produire de l'hydrogène pur à plus de 99,999%, d'une manière non polluante lorsque l'électricité utilisée provient de source renouvelable (solaire photovoltaïque ou éolienne). L'hydrogène produit par un électrolyseur est idéal pour la consommation par une pile à combustible. Les réactions qui ont lieu dans un électrolyseur sont très similaires à celles qui prennent place dans une pile à combustible, sauf que celles-ci sont inversées, de même que l'anode et la cathode. Dans une pile à combustible l'hydrogène est l'endroit de l'anode et dans un électrolyseur, l'hydrogène est l'endroit de la cathode et produit à côté de l'anode, donc la réaction électrochimique est inverse de la pile à combustible. Les électrolyseurs sont très utiles lorsqu'ils sont intégrés dans des installations stationnaires, portables ou pour produire l'hydrogène servant à alimenter les moyens de transport et sous-marins a été le premier à utiliser.

1.2 L'électrolyseur

1.2.1 Historique

L'histoire des électrolyseurs a commencé dans les années 1800 et continua son développement dans les années 1900 et dans le 21^{ème} siècle.

En 1800, les deux chimistes britanniques William Nicholson et Anthony Carlisle sont les premiers à découvrir la production de l'hydrogène et de l'oxygène par électrolyse de l'eau. Ils décrivent le procédé permettant de décomposer l'eau en hydrogène et en oxygène à l'aide d'électricité. Ils utilisèrent des électrodes de platine et des tubes de verre pour collecter le gaz sur chaque électrode. L'hydrogène se formait par bulles sur une électrode et l'oxygène sur l'autre électrode dans une proportion de deux volumes d'hydrogène pour un volume d'oxygène. La figure (1.1) représente le processus d'électrolyse découvert par Nicholson et Carlisle [1].

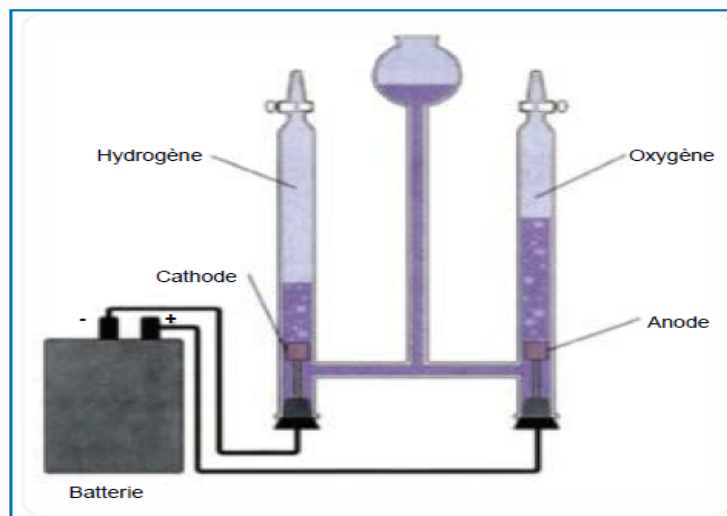


FIGURE 1.1 – Le processus d'électrolyse découvert par Nicholson et Carlisle, [2].

En 1820, Faraday énoncera le principe de l'électrolyse clarifié. En 1832, il établit les lois quantitatives de l'électrolyse. En 1834, il utilise le mot électrolyse pour la première fois.

En 1900, fabrications de premier électrolyseur industriel bipolaire.

En 1939, le premier électrolyseur dédié à la production d'oxygène à grande échelle (Productions des gaz $> 104\text{m}^3/\text{h}$) est installé au Canada.

Il est de technologie alcaline à plaques mono-polaires. Il sera ensuite reconverti pour produire de l'hydrogène pour la fabrication d'engrais.

En 1948, le fabricant Lurgi apporte une innovation majeure en développant le procédé d'électrolyse sous pression, ce qui permettait de s'affranchir d'une unité de compression pour le stockage des gaz produits et de fonctionner à plus haute température.

En 1951, Lurgi présente le premier électrolyseur haute pression 30bar.

En 1958, la première installation de ce type est mise en place au Pérou à Cuzco.

Depuis les années 60, le champ d'application de l'électrolyse s'est élargi, incitant les industriels et la recherche à développer des technologies innovantes.

En 1962-1966, fabriquée la première cellule polymère par programme Gemini-Apollo.

En 1966, fabriquée le premier électrolyseur SPE (Solid Polymer Electrolyte).

En 1980, notamment avec l'arrivée de nouvelles membranes de types Nafion, la société Dupont de Nemours utilisera la membrane conductrices de protons Nafion comme électrolyte.

En 1987, le premier électrolyseur PEM (Polymer Electrolyte Membrane) de 100kW [1].

1.2.2 Conceptions d'électrolyseurs

Les électrolyseurs peuvent être classés en deux principaux concepts :

1.2.2.1 Concept unipolaire

Un concept unipolaire utilise typiquement des électrolytes liquides. L'électrolyseur unipolaire élémentaire est représenté par la figure (1.2).

Disposaient de plaques mono-polaires. C'est-à-dire que chaque anode est connectée au pôle positif et chaque cathode au pôle négatif, les cellules d'électrolyse fonctionne alors en parallèle et soumis à une tension de 1,9 à 2,5V. Ce concept est facile à réaliser et à réparer, mais il n'est pas aussi efficace qu'un électrolyseur moderne [3].

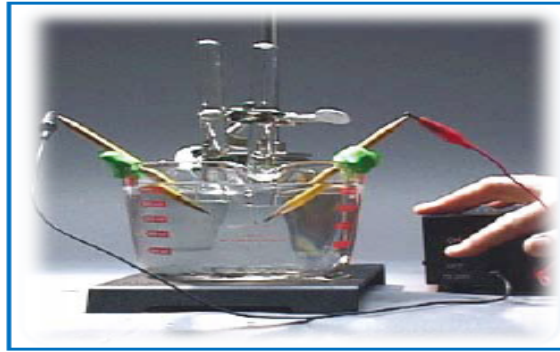


FIGURE 1.2 – L'électrolyseur unipolaire, [2].

1.2.2.2 Concept bipolaire

Un concept bipolaire utilise un polymère solide comme électrolyte. L'électrolyseur bipolaire est constitué de plusieurs couches pressées ensemble, comme montre dans la figure (1.3). Utilisent des plaques jouant le rôle d'anode d'un

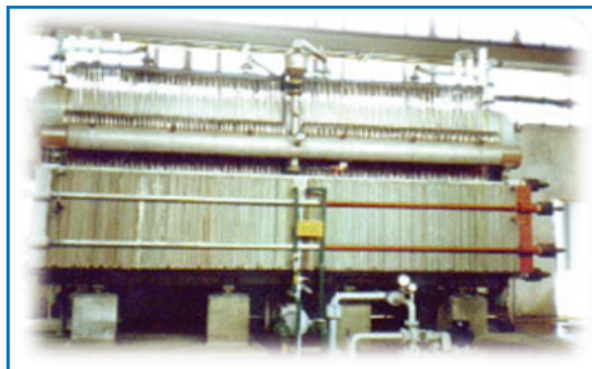


FIGURE 1.3 – L'électrolyseur bipolaire, [2].

côté et de cathode de l'autre. Les éléments (ou cellules) sont connectés en série ce qui résulte en des tensions de piles plus élevées et d'une meilleure compacité. Cette conception introduit cependant une difficulté supplémentaire. Ces piles peuvent être petites car chaque couche est très mince. Les avantages des électrolyseurs bipolaires sont qu'ils permettent des densités de courant bien plus importantes et une pression de gaz hydrogène plus élevée. Originellement, une couche d'amiante était utilisée pour séparer les éléments mais aujourd'hui, des matériaux polymères tels que le Nafion[®] de DuPontTM l'ont remplacée. Néanmoins, la grande majorité des systèmes industriels reposent sur le concept

bipolaire [3].

1.2.3 Les différents types d'électrolyseurs

Il existe trois technologies d'électrolyseur d'eau. Chacune d'elle dépend de la nature de l'électrolyte utilisé dont résulte leur température de fonctionnement [4] :

- Electrolyseur alcalin AE (Alkaline Electrolyser).
- Electrolyseur à membrane échangeuse de proton PEME (Proton Exchange Membrane Electrolyser).
- Electrolyseur à oxyde solide SOE (Solid Oxid Electrolyser).

Le tableau (1.1) exprime les différents types de l'électrolyseur, [4].

TABLE 1.1 – Les différents types de l'électrolyseur, [4].

Électrolyseur	PEME	AE	SOE
Rendement	80 – 90%	70 – 90%	80 – 90%
Température	20 – 100°C	40 – 90°C	700 – 1000°C
Pression	1 – 400bar	3 – 30bar	50bar
Électrolyte	Polymère membrane (Nafion) [solide]	Potassium (KOH) [liquide]	Céramique [solide]
Catalyseur	Platine	Platine, Nickel	Cermet Nickel zircone
Porteur de charge	Acide [H^+]	Basique [OH^-]	Basique [O^{2-}]
Consommation de H_2	6kwh/Nm ³	4 – 5kwh/Nm ³	3 – 3,5kwh/Nm ³
Densité de courant	2A.cm ⁻² (forte)	< 0,4A.cm ⁻²	forte
Durée de vie	15 – 20(ans)	15 – 20(ans)	
Fiabilité	Haute fiabilité dans le temps (utilisation spatiale, sous-marins)	Utilisation commerciale (éprouvée)	

1.3 Électrolyseur PEM(Polymère Électrolyte Membrane)

L'électrolyseur PEM (Polymère Électrolyte Membrane) est le plus populaire et la plupart des électrolyseurs modernes sont construits selon ce concept. L'électrolyseur PEM utilise le même polymère que la pile à combustible PEM. Leur électrolyte est une fine membrane solide permettant la conduction des ions. Donc ces électrolyseurs utilisent le concept bipolaire. Le platine est le catalyseur le plus utilisé pour cet électrolyseurs. Un catalyseur est appliqué de chaque côté de la membrane. Il est nécessaire pour décomposer l'eau en oxygène et hydrogène (faciliter la dissociation des molécules d'eau en hydrogène et oxygène), afin de convertir l'énergie électrique en énergie chimique [6].

1.3.1 Constitutions d'un électrolyseur PEM

L'électrolyseur PEM est constituée même constitutions que la pile à combustible. Il est constitué d'un empilement de cellules qui forment un stack. Ces cellules élémentaires sont assemblées en série électrode-membrane-électrode (EME). Une cellule d'électrolyseur est constituée de deux électrodes. électrode positive (anode) et électrode négative (cathode) séparées par un électrolyte solide. Cet électrolyte à base d'acide sulfurique, soit une membrane polymère échangeuse de protons (Nafion[®]). De chaque coté de l'électrode, on trouve deux couches de diffusion (zone de réaction) et deux plaques bipolaires [5].

1.3.2 Principe de fonctionnement d'un électrolyseur PEM

Les deux chimistes britanniques William Nicholson et Anthony Carlisle qui sont énonceront le principe de l'électrolyse de l'eau. Ils décrire le procédé permettant de décomposer l'eau en hydrogène et oxygène à l'aide d'électricité. L'électrolyseur PEM fonctionne selon le principe de l'électrolyse de l'eau. Il est une réaction électrochimique «d'oxydo-réduction» permet de produire de l'oxygène et l'hydrogène à partir de l'électricité et de l'eau, l'hydrogène est produite au niveau de l'anode (oxydation), l'oxygène est produit au niveau de

la cathode (réduction). Dans l'électrolyseur de type PEM la membrane polymère permet aux ions (H^+) de passer du côté anode de la membrane au côté cathode; son structure de base est représentée par la figure (1.4). Il sépare

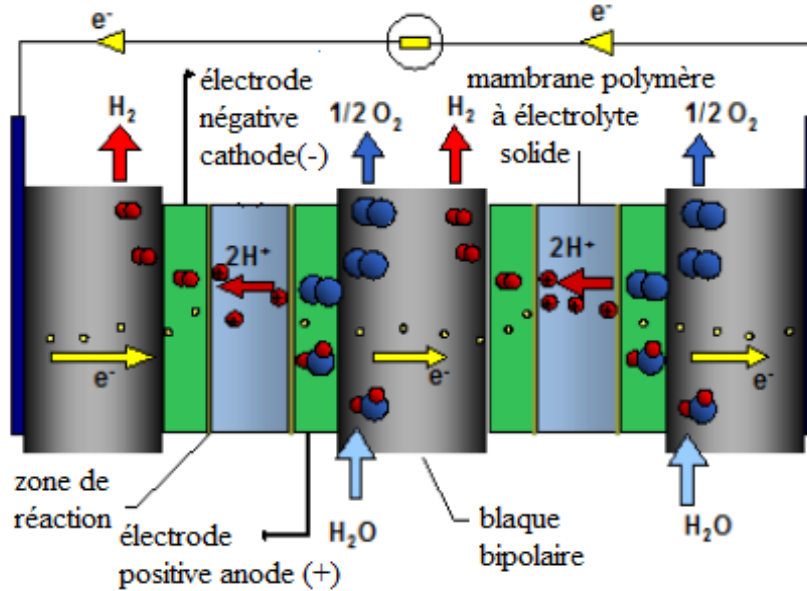


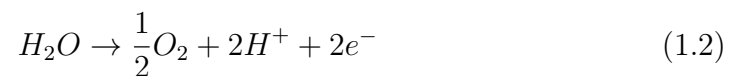
FIGURE 1.4 – La structure de base d'un électrolyseur de type PEM, [1].

également les gaz hydrogène (H_2) et oxygène (O_2). Selon les réactions oxydation à côté de l'anode et réduction à côté de la cathode [1], ces équations sont décrites comme suit :

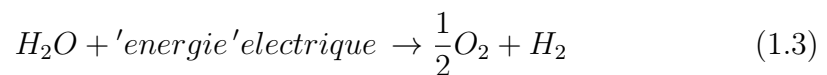
Anode :



Cathode :



Réaction globale :



1.3.3 Les avantages et les inconvénients d'un électrolyseur PEM

1.3.3.1 Les avantages d'un électrolyseur PEM

L'électrolyseur PEM possède des nombreux avantages [4] et [5] :

- Rendement électrique élevé (80 – 90%).
- Électrolyte solide (pas de pièces mobiles, pas de liquide corrosif).
- Compacité du système, Fortes densités de courant.
- Conception compacte (bipolaire).
- Grande production de gaz sous pression.
- Fonctionnement à haut pression.
- Réponse rapide aux variations de charge.
- Haute pureté des gaz produits.
- Durabilité.

1.3.3.2 Les inconvénients d'un électrolyseur PEM

L'électrolyseur PEM possède des nombreux inconvénients [4] et [5] :

- Le coût élevé des membranes polymères.
- Des catalyseurs en métal noble.
- Processus de fabrication compliqués et coûteux.
- Le coût élevé des catalyseurs.
- Stack inférieur au MW.

1.4 Les majeures techniques de production d'hydrogène

L'hydrogène possède beaucoup de caractéristiques avantageuses comparé à d'autres éléments. C'est en fait l'élément le plus abondant dans l'univers, il est plus léger et il est très utile car il représente une énergie sous forme chimique qui peut être transformée en énergie électrique, donc il est souvent présenté comme un vecteur énergétique (surtout comme combustible). L'hydrogène n'existe pratiquement pas à l'état naturel sur terre ; il est presque toujours combiné à d'autres éléments, il peut brûler mélangé à l'oxygène, où le composé de l'hydrogène le plus important et le plus abondant est l'eau. Les filières hydrogène restent handicapées par des coûts trop élevés. Ces problèmes peuvent être maîtrisés par des procédures adéquates. A partir les problèmes

qu'ont dites précédentes, on distingue plusieurs techniques pour produire la production de l'hydrogène. Actuellement l'hydrogène est produit à partir de différents procédés. De nos jours, l'hydrogène est produit pour près de 96 % à partir d'énergie fossile tel que le gaz naturel le charbon et, de loin, 4 % à partir d'électrolyse de l'eau [7], comme dit dans la figure (1.5).

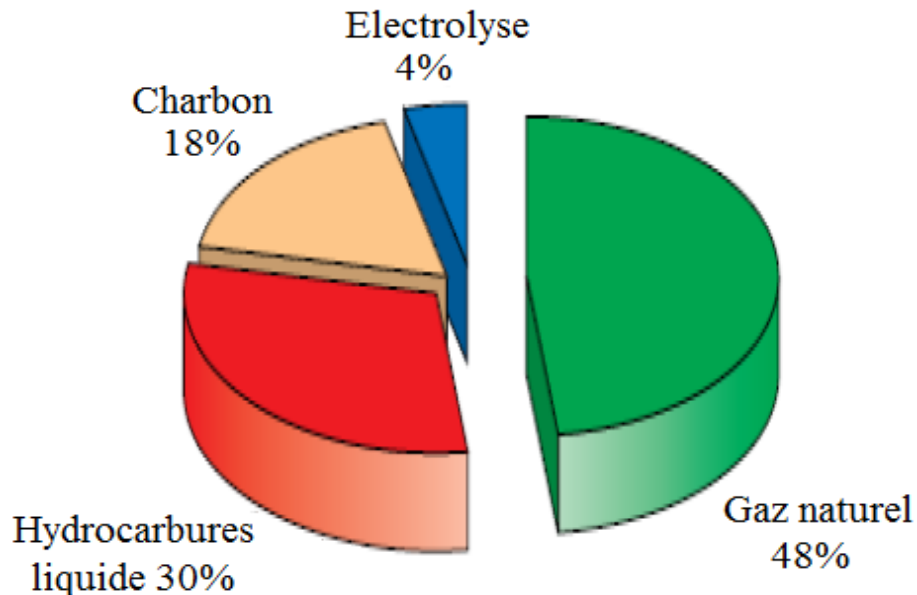


FIGURE 1.5 – Principales origines de l'hydrogène produit aujourd'hui dans le monde, [7].

1.4.1 Production d'hydrogène à partir de l'énergie fossile

L'hydrogène peut actuellement être produit à partir de deux procédés [6] :

1. Production d'hydrogène à partir du gaz naturel :

L'hydrogène peut actuellement être produit à partir du gaz naturel au moyen de trois processus chimiques différents :

- Le vaporeformage du gaz naturel (SMR).
- Oxydation partielle (POX).
- Le reformage autotherme (ATR).

2. Production d'hydrogène à partir du charbon.

1.4.2 Production d'hydrogène à partir de l'énergie nucléaire

1.4.3 Production d'hydrogène à partir de l'énergie renouvelable

L'hydrogène peut actuellement être produit à partir de quatre procédés [6] :

1. Production d'hydrogène à partir de la biomasse.
2. Production d'hydrogène à partir de l'énergie solaire :
L'hydrogène est produit, par voie solaire, principalement à l'aide de procédés thermo-chimique, photo-électrochimique et électrolytique :
 - Procédés thermo-chimiques.
 - Procédés photo-électrochimiques.
 - Procédés électrolytiques.
3. Production d'hydrogène à partir de l'énergie éolienne.
4. Production d'hydrogène à partir de l'énergie hydraulique.

1.4.4 Production d'hydrogène à partir de l'électrolyse de l'eau

Cette technique, se fait au moyen de trois processus différents [6] :

1. Électrolyseur alcalin.
2. Électrolyseur à oxyde solide.
3. PEM (Polymère Électrolyte Membrane) : Voir le principe de fonctionnement d'un électrolyseur PEM (Polymère Électrolyte Membrane) P8.

1.5 Les modes de stockage d'hydrogène

Il existe de multiples modes de stockage de l'hydrogène. A l'heure actuelle, trois méthodes de stockage d'hydrogène remplissent ces exigences à différents niveaux :

1.5.1 Stockage d'hydrogène sous pression (faible et élevée)

Le stockage de l'hydrogène sous pression, se fait par :

1.5.1.1 La compression du gaz

Le stockage sous forme comprimée est le plus utilisé, la pression varie entre 200 – 350 et 700bar pour les pressions de stockage les plus élevées. À sa pression de fonctionnement, l'électrolyseur fournit l'hydrogène au système de stockage. Le réservoir de stockage a une pression de stockage sécuritaire maximale. L'électrolyseur à lui seul ne pouvant pas comprimer l'hydrogène de pression de fonctionnement jusqu'à la pression de stockage sécuritaire maximale, un système de compression (compresseur mono ou multi-étage), entre lui et le réservoir, pour assurer cette tâche [8].

1.5.1.2 Le refroidissement du gaz

La compression adiabatique à plusieurs étages. Une compression multi-étage implique pour des raisons mécaniques le refroidissement du gaz comprimé entre chaque étage. Il est souvent conseillé pour une bonne régulation du refroidissement d'utiliser un refroidissement externe. Lors d'un remplissage rapide, on assiste à une augmentation de température [8].

1.5.1.3 Le réservoir

L'hydrogène peut être stocké dans des bouteilles de 10 litres jusqu'à des réservoirs de 10000m³. Les bouteilles commercialisées actuellement 50 litres permettent un stockage jusqu'à 350bar. Il existe des réservoirs ronds ou cylindriques. Le réservoir est fait d'alliages métalliques très résistants à la corrosion. Pour réduire davantage le poids, on tente d'introduire des polymères et des fibres de carbone dans la structure [8].

1.5.2 Stockage d'hydrogène sous forme liquide

L'hydrogène est stocké sous forme liquide à -253°C . Le réservoir a souvent deux parois séparées par un espace pour éviter les pertes thermiques par convection. Cet espace peut être sous vide, ou bien constitué de matériaux super-isolants ou enfin rempli d'air liquide. Le réservoir est généralement en acier mais des matériaux composites sont développés afin de l'alléger. On atteint des densités énergétiques de 22MJ/kg (rapporté au réservoir) [8].

1.5.3 Stockage d'hydrogène par hydrure métallique

C'est une forme de stockage d'hydrogène qui permet à celui-ci de s'insérer dans le réseau cristallin d'un métal avec lequel l'hydrogène a la propriété de former des liaisons covalentes ou ioniques. Ce type de métaux ou alliages peuvent donc stocker l'hydrogène entre leurs atomes dans des réservoirs à hydrures métalliques. Le stockage sous forme d'hydrures métalliques peut s'effectuer à des températures et des pressions modérées, ce qui représente un avantage pour la sécurité comparé au stockage sous forme de gaz comprimé ou sous forme liquide. Les hydrures métalliques offrent une densité de stockage supérieure à la densité obtenue par stockage sous forme de gaz comprimé ou de liquide. C'est pourquoi le stockage sous forme d'hydrure métallique est souhaitable pour l'utilisation sur des véhicules [8].

1.6 Aspects de sécurité avec l'hydrogène en temps que combustible

Un obstacle critique vers l'adoption de l'hydrogène en temps que combustible pour le grand public, est la perception du danger qui lui est lié. Contrairement à ce que pense le public, l'hydrogène s'enflamme plus difficilement que l'essence de leur voiture ou que d'autres combustibles fossiles. Comme tous les combustibles l'hydrogène comporte des risques s'il n'est pas stocké ou transporté correctement. Ces risques peuvent être maîtrisés par des procédures adéquates ainsi que des contrôles. Comme l'hydrogène est une petite molécule, il a ten-

dance à s'échapper par de très petits orifices, plus facilement que d'autres gaz ou d'autres liquides. Si de l'hydrogène s'échappe, il se disperse beaucoup plus rapidement que tout autre combustible et sans polluer. L'hydrogène est plus léger et se diffuse plus rapidement que l'essence, le propane, ou le gaz naturel. Si une explosion devait se produire, l'hydrogène possède la plus faible puissance détonante par unité de combustible stocké. Les dangers potentiels de l'hydrogène à bord d'un véhicule sont l'explosion et la toxicité. Un feu d'hydrogène pourrait se déclarer à la suite d'un problème avec le système de stockage, ou avec la pile à combustible elle-même. De nombreux systèmes de contrôle existent pour rendre l'utilisation des piles à combustible et de l'hydrogène très sûrs [2].

- Prévention des fuites par des tests et des contrôles scrupuleux des réservoirs et de l'équipement.
- Installation de valves.
- Conception de l'équipement pour résister aux chocs aux vibrations et à une gamme de température étendue.
- Adjonction de capteurs d'hydrogène ou de détecteurs de fuite.
- Prévention d'allumage en éliminant les sources d'étincelles ou d'arcs électriques.
- Disposition des conduits de gaz afin d'éviter le contact avec le reste de l'équipement.

1.7 Conclusion

D'abord, dans ce chapitre on a vu l'historique d'un électrolyseur et leur conception. Ensuite, nous avons parlé sur les différents types d'un électrolyseur puis on a spécifié le type PEM, constitutions, principe de fonctionnement et aussi les avantages et les inconvénients de ce type. Enfin, l'électrolyse de l'eau a été conçues beaucoup plus comme moyen de production d'hydrogène. Nous avons présenté les majeures techniques de production d'hydrogène, stockage et les aspects de sécurité.

Chapitre 2

Généralité sur l'énergie photovoltaïque

2.1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque est une transformation directe de la lumière en électricité c'est-à-dire en transformant l'énergie des photons arrivant à la surface de la terre en électricité. Elle utilise le soleil comme source de lumière, la lumière solaire (photons) transmet son énergie aux électrons dans un semi-conducteur (qui constitue une cellule photovoltaïque). Cette transformation (effet photovoltaïque) est sans action mécanique, sans bruit, sans pollution et sans combustible. L'effet photovoltaïque a été découvert par le physicien Français A. Becquerel en 1839. Le mot «photovoltaïque» vient du mot «photo» (du grec «phos» qui signifie «lumière») et du mot «Volt» (patronyme de physicien Alessandro Volta qui a contribué de manière très importante à la recherche en électricité).

2.2 Les principaux composants d'un système PV

Un système solaire photovoltaïque est généralement constitué de trois éléments principaux. La figure (2.1) montre les principaux composants d'un système photovoltaïque.

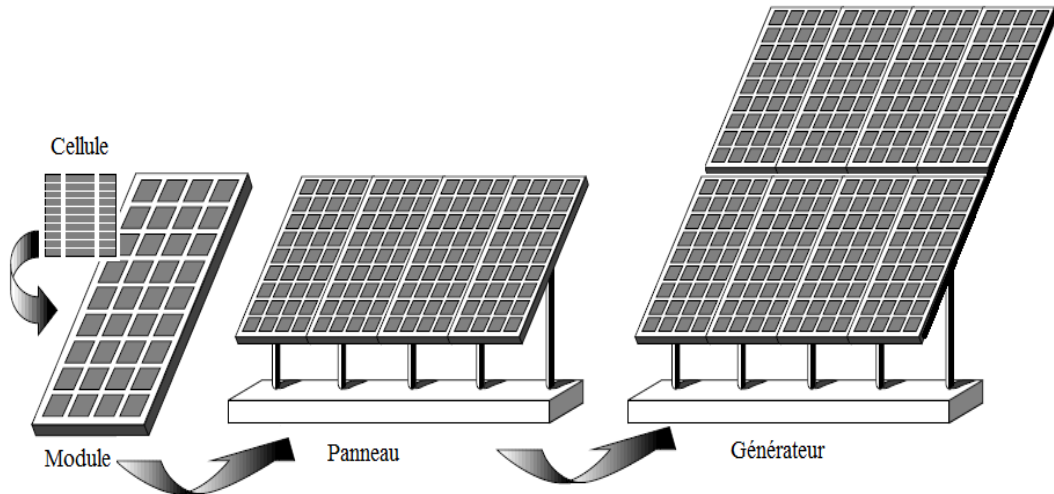


FIGURE 2.1 – Les principaux composants d’un système photovoltaïque, [7].

2.2.1 Générateur photovoltaïque

Le GPV représente la partie de conversion de l’énergie contenue dans la lumière du soleil en énergie électrique en courant continu. Cette partie est essentiellement composée d’un ensemble de panneaux photovoltaïques. Structurés en série ou en parallèle ou hybride (mixte). Pour garantir une durée de vie importante d’une installation photovoltaïque destinée à produire de l’énergie électrique sur des années, nous devons assurer la protection électrique de cette installation, en augmenter sa durée de vie afin d’éviter des pannes destructrices liées à l’association des cellules en séries et de leur fonctionnement en cas d’ombrage et aussi de panneaux en parallèles. Pour cela, deux types de protections classiques sont utilisés dans les installations actuelles [9].

– Les diodes anti-retour :

Dans le cas de plusieurs chaînes de cellules mises en parallèle sur une charge et des panneaux mises en parallèle, le risque est que des chaînes de cellule éclairées débitent dans des chaînes ombrées ou que la charge ne se décharge à travers le générateur. On dispose pour cela des diodes anti-retour mises en série avec le GPV (de blocage). Cette diode est indispensable quand la charge du module PV est une batterie. En fait, cette diode évite que la batterie ne débite sur le module PV pendant la nuit [10].

– Les diodes by-pass :

Dans le cas de plusieurs chaînes des cellules mises en série et parfois pour la mise en série des panneaux solaires. On dispose pour cela les diodes by-pass peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène (effet d'ombrage) évitant ainsi l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées, ils mises en parallèle avec le GPV [10].

2.2.2 Panneau photovoltaïque

Le panneau solaire ou (champ solaire) est constitué de plusieurs modules photovoltaïques interconnectés en série ou en parallèle ou mixte, afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique [11].

2.2.3 Cellule photovoltaïque (photopile)

La cellule solaire, qu'on appelle aussi photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque, est fabriquée à l'aide de matériaux semi-conducteurs comme les transistors ou les puces dans un ordinateur. On peut la représenter comme une diode plate qui est sensible à la lumière et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique, elles structurées en série ou en parallèle ou mixte. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthylène-vinyl-acétate) et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière d'une ou de polyéthylène. Une cellule photovoltaïque est basé sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque [7] et [12]. Cette dernière développe par la figure (2.2).

Une cellule PV peut être réalisée avec de nombreux semi-conducteurs. En réalité, la filière silicium représente aujourd'hui la principale filière technologique dans le monde, il s'agit d'un matériau extrêmement abondant, stable est non toxique. Il existe trois technologies principaux des cellules voir la figure (2.3) [7] et [12] :

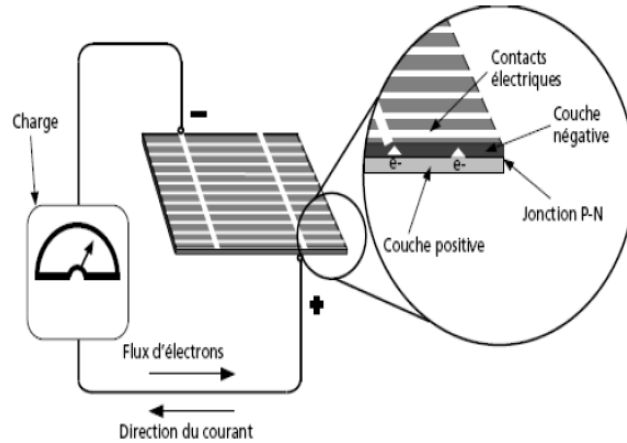


FIGURE 2.2 – Description d’une cellule photovoltaïque ou photopile, [7].

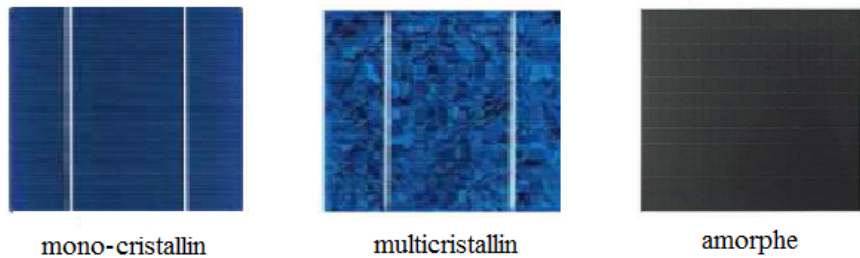


FIGURE 2.3 – Les technologies de cellule photovoltaïque, [12].

- Les cellules mono-cristallines.
- Les cellules multicristallines (poly-cristallines).
- Les cellules amorphes.

2.2.3.1 Cellule mono-cristalline

Une cellule mono-cristalline représente plus de 80% du marché, elle est difficile à obtenir. Lors du refroidissement le silicium fondu, de le solidifier en ne formant qu’un seul cristal de dimension importante et d’une très grande pureté. Ces cellules sont en générale d’un bleu uniforme, intense et brillant. Elles sont utilisées, mais ne sont pas majoritaires sur le marché de l’énergie photovoltaïque. Le rendement du silicium mono-cristallin est le plus élevé, il est compris entre 12 et 20% pour les cellules industrielles, mais aussi celle qui a le coût le plus élevé est aujourd’hui un handicap et le silicium mono-cristallin

perd du terrain devant le silicium multicristallin, du fait d'une fabrication compliquée. Tous usages en extérieur de fort et moyen éclairage et de forte et moyenne puissance (télécoms, balisage, relais, habitat ...) [11], [12] et [13].

2.2.3.2 Cellule multicristalline (poly-cristalline)

Une cellule multicristalline est devenue aujourd'hui la technologie la plus utilisée. A elle seule elle représente près de 50% du marché pendant le refroidissement consécutif à la fusion, la formation de plusieurs cristaux de silicium. La cellule photovoltaïque produite par cette filière se singularise par un aspect bleu électrique non uniforme, laissant apercevoir les motifs créés par les divers cristaux la composant. Son rendement est légèrement inférieur au silicium mono-cristallin, il est compris entre 10 et 14% selon les fabricants, les coûts de production sont donc plus faibles. En revanche la fabrication est beaucoup plus simple. Tous usages identiques à celui du silicium cristallin [11], [12] et [13].

2.2.3.3 Cellule amorphe

Une cellule amorphe représente plus de 7% du marché mondial. Le silicium est déposé à basse température sur un substrat en verre. De plus il est possible de déposer ces cellules sur des substrats souples et ainsi de fabriquer des cellules souples. Ce type de cellules nécessite l'utilisation d'une isolation galvanique entre les modules et le réseau. Sans cette isolation galvanique les cellules amorphes se dégradent très rapidement. Elles ont un faible rendement, il est compris entre 8 et 10%, mais son coût est plus faible que les cellules cristallines. Tous usages électronique professionnelle et grand public (montres, calculettes ...), électronique de faible consommation en extérieur, baies vitrées semi transparentes [11], [12] et [13].

2.3 Association des cellules photovoltaïques

La puissance disponible aux bornes d'une cellule PV est plus faible, typiquement de 0,5W, il est nécessaire d'associer les cellules en série ou en parallèle ou

série-parallèle, afin d'obtenir la puissance compatible et ensuite, afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité de courant souhaité. Ainsi pour (N_s) cellule en série, constituant des branches elles-mêmes (N_p) en parallèle [14]. La puissance disponible en sortie d'un GPV est donnée par :

$$P_{pv} = N_s \times V_{pv} \times N_p \times I_{pv} \quad (2.1)$$

Avec :

P_{pv} : La puissance disponible en sortie du GPV.

V_{pv} : La tension de sortie du GPV.

I_{pv} : Le courant de sortie du GPV.

2.3.1 Association en série

Le regroupement des cellules en série (N_s) permet d'augmenter la tension du GPV par contre le courant traversées les cellules reste le même. La tension augmente proportionnellement au nombre de cellules en série (N_s) et donc permet d'accroître la puissance du GPV, une telle association des cellules série est représenté par la figure (2.4) [14].

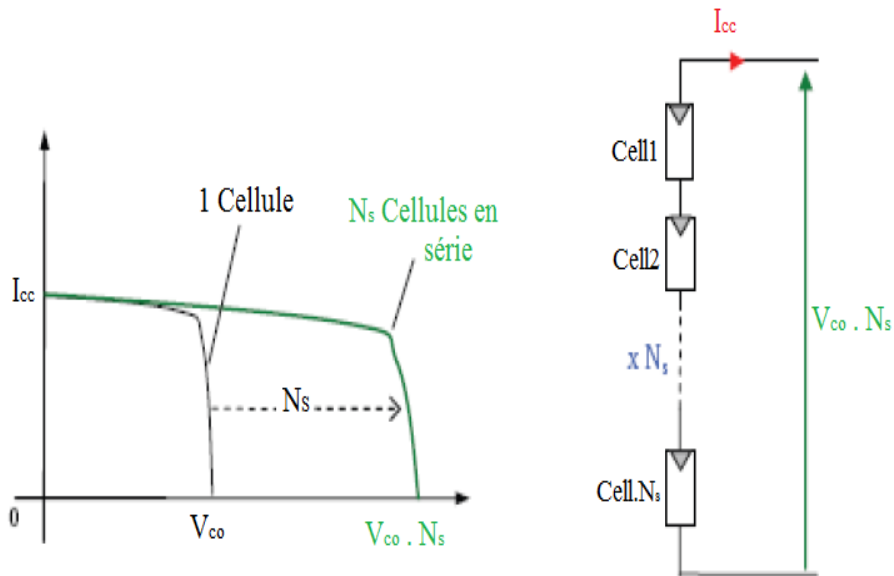


FIGURE 2.4 – Les caractéristiques d'une association série de (N_s) cellules, [14].

Où :

$$V_{coN_s} = N_s \times V_{co}; I_{cc} = I_{ccN_s} \quad (2.2)$$

Avec :

I_{cc} : Le courant de court-circuit.

V_{co} : La tension du circuit ouvert.

V_{coN_s} : La somme des tensions en circuit ouvert de (N_s) cellules en série.

I_{ccN_s} : Le courant de court-circuit de (N_s) cellules en série.

L'équation(2.2) et la figure (2.4) résument les caractéristiques électriques d'une association série de (N_s) cellules.

2.3.2 Association en parallèle

Le regroupement des cellules en parallèle (N_p) permet d'augmenter le courant du GPV par contre la tension aux bornes des cellules reste le même. Le courant augmente proportionnellement au nombre de cellules en parallèle (N_p) et donc permet d'accroître la puissance du GPV, une telle association des cellules parallèle est représenté par la figure (2.5) [14].

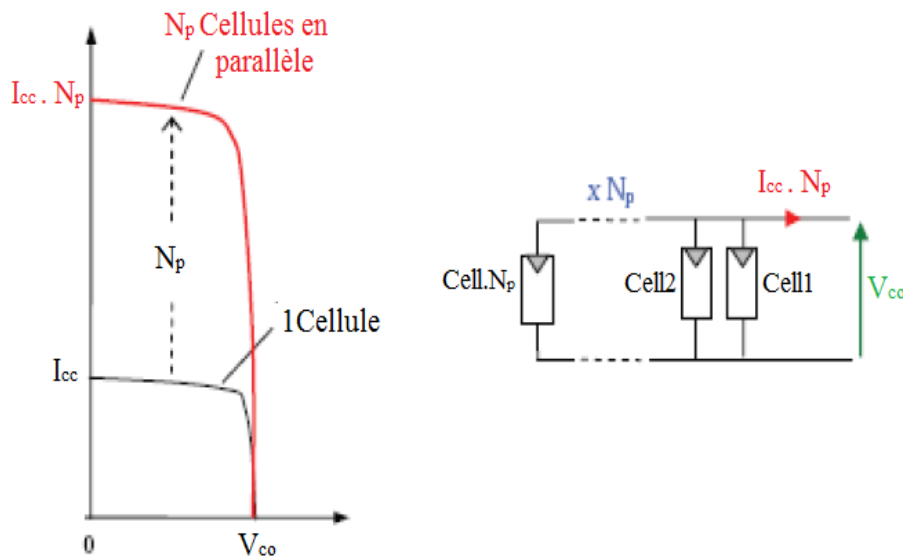


FIGURE 2.5 – Les caractéristiques d'une association parallèle de (N_p) cellules, [14].

Où :

$$I_{ccN_p} = N_p \times I_{cc}; V_{co} = V_{coN_p} \quad (2.3)$$

Avec :

I_{cc} : Le courant de court-circuit.

V_{co} : La tension du circuit ouvert.

I_{ccN_p} : La somme des courants de court-circuit de (N_p) cellules en parallèle.

V_{coN_p} : La tension du circuit ouvert de (N_p) cellules en parallèle.

L'équation(2.3) et la figure (2.5) résumant les caractéristiques électriques d'une association parallèle de (N_p) cellules.

2.3.3 Association en série-parallèle

Le regroupement des cellules en série-parallèle ($N_s \times N_p$) permet d'augmenter la tension et le courant du GPV, la tension et le courant augmentent proportionnellement au nombre de cellules série-parallèle ($N_s \times N_p$) et donc permet d'accroître la puissance du GPV, une telle association des cellules série-parallèle avec une diode de protection est représenté par la figure (2.6) [14].

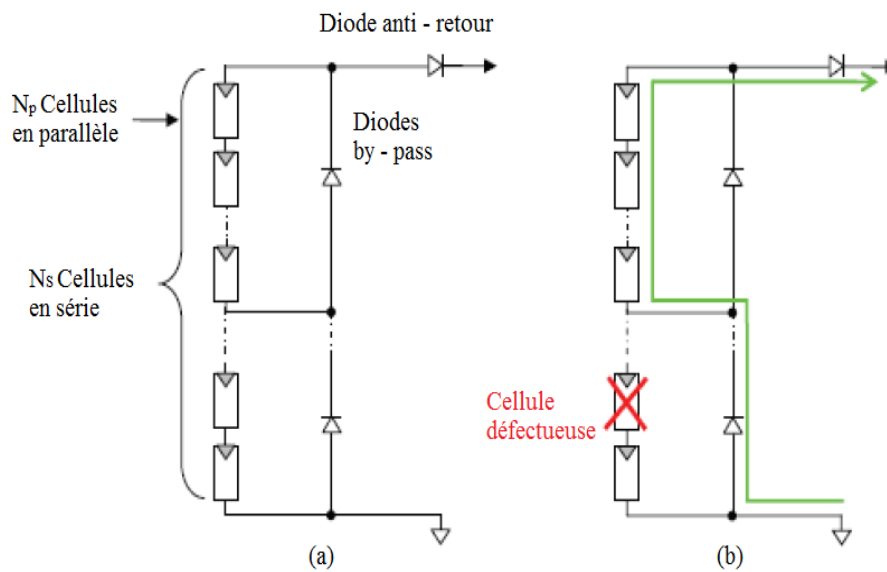


FIGURE 2.6 – (a) : Architecture classique d'un panneau solaire PV avec diodes de protections (b) : défaillance d'une cellule du module PV et activation de la diode (by-pass) mise en évidence du courant de circulation I_{pv} , [14].

2.4 Conclusion

D'abord, dans ce chapitre nous avons étudié les principaux composants d'un système photovoltaïque tel que, le générateur photovoltaïque, le panneau photovoltaïque et la cellule photovoltaïque. Ensuite, nous avons parlé sur les technologies les plus utilisés. Enfin, nous avons donné quelque rappelle sur les associations des cellules photovoltaïques.

Chapitre 3

Les convertisseurs DC-DC

3.1 Introduction

L'utilisation des convertisseurs DC-DC permet le contrôle de la puissance électrique dans les circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé. Dans les systèmes photovoltaïques les convertisseurs DC-DC permettent de poursuivre le point de fonctionnement optimum.

Les convertisseurs demandent un nombre de composants relativement réduit. Idéalement, un convertisseur doit en effet :

- Posséder un rendement élevé.
- Présenter un niveau de sécurité élevé, notamment en répondant aux normes d'isolation entre l'utilisateur et le réseau.
- Posséder une fiabilité élevée relativement à la durée de vie de l'application, en ce compris la résistance aux contraintes de l'environnement (vibrations, température, humidité...).
- Être la plus petite et la plus légère possible.
- Et bien entendu être de préférence peu coûteuse.

Dans le cas où les semi-conducteurs de puissance peuvent être considérés comme des interrupteurs l'analyse du principe de fonctionnement des convertisseurs de puissance est évidemment grandement facilitée.

3.2 Les convertisseurs DC-DC

Les convertisseurs statiques continu-continu ce sont nommés aussi hacheurs. Permettent d'obtenir une source de tension/courant continu variable à partir d'une source de tension/courant continu fixe [16]. La figure (3.1) représente la structure d'un convertisseur statique DC-DC.

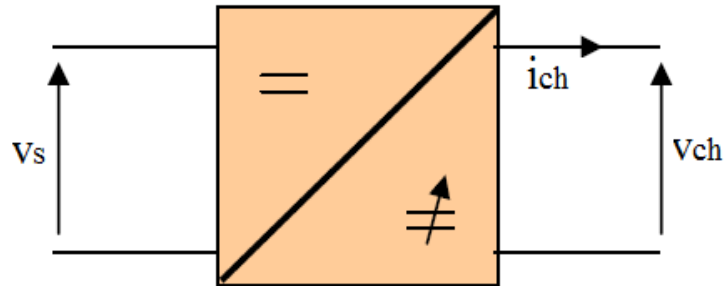


FIGURE 3.1 – structure d'un convertisseur statique continu-continu, [16].

3.3 Réversibilité et non réversibilité d'un convertisseur DC-DC

Quand il s'agit de conversion d'énergie, la notion de sens de conversion est importante. Suivant le schéma de structure d'un convertisseur statique continu-continu. On va dit que le convertisseur statique peut être réversible ou bien non réversible [17]. Comme dit dans la figure (3.2).



FIGURE 3.2 – Réversibilité et non réversibilité d'un convertisseur DC-DC, [17].

3.4 Les interrupteurs utilisés

Ils y'a plusieurs interrupteurs utilisé dans les convertisseurs DC-DC. Ils peuvent être classés en deux groupes :

1. Interrupteurs non commandable :

- Diodes : États fermé ou ouvert contrôlés par le circuit de puissance. La diode de roue libre assure la continuité du courant inductif pendant l'absence du courant fourni par la source.

2. Interrupteurs commandable à l'ouverture ou commandable à l'ouverture et à la fermeture : Ouverts et fermés par un signal de commande. L'interrupteur commandable inclut de nombreux types de composants :

- Thyristor commandés à l'ouverture (GTO), «Gate-Turn- Off Thyristor».
- Transistor Bipolaire à Jonction (BJT), «Bipolar Junction Transistors».
- Transistor à effet de champ (MOSFET), «Metal-Oxyde-Semi-conductor Field Effect Transistor» :

Ils se commandent avec une tension, possède naturellement une diode en inverse. A l'avantage d'une commande relativement simple qui nécessite peu de puissance. Commuter très rapidement, capable de fonctionner a des fréquences élevées, d'une grande fiabilité, facilitant de filtrage. Facile à commander, moyenne performances dynamique. Ces composants sont de plus en plus utilisés dans les systèmes modernes de traitement de l'énergie électrique, comme les onduleurs, les redresseurs MLI, les convertisseurs multi-niveaux [18].

- Transistor bipolaire à grille isolée (IGBT), «Insulated Gate Bipolar Transistor» :

Ils se commandent avec une tension, possède naturellement une diode en inverse. Sont très utilisé dans le domaine des moyennes et fortes puissances. Les concepteurs ont voulu avoir les avantages suivantes : Capable de fonctionner a des fréquences moyenne, leur tension élevée à l'état ouvert, tension faible à l'état fermé, facile à commander et bon performances dynamique. Pour une commutation des tensions élevées à des hautes fréquences, les transistors de type MOSFET représentent un bon choix, car à l'état pas-

sant leur résistance série est très faible alors qu'à l'état bloqué, ils se comportent comme un circuit ouvert, ils impliquent aussi une bonne isolation de la partie commande de la partie puissance. C'est-à-dire selon les exigences de l'application, on a choisit l'interrupteur adéquate [18].

3.5 Les différents types d'un convertisseur DC-DC

Selon le schéma de principe des convertisseurs DC-DC. On distingue deux topologies des convertisseurs DC-DC. Ces topologies lui-même sont classées en catégories :

3.5.1 Convertisseurs continu-continu non isolé

Les topologies non isolées ne comportent pas de transformateurs d'isolement. Elles sont généralement utilisées dans l'entraînement des moteurs à courant continu. Ces topologies sont encore classées en cinq catégories [19] et [20] :

- Convertisseur Buck, (dévolteur).
- Convertisseur Boost, (survolteur).
- Convertisseur Buck-Boost, (dévolteur-survolteur).
- Convertisseur SEPIC (Single Ended Primary Inductor Converter).
- convertisseur Cuk.

3.5.2 Convertisseurs continu-continu isolés

Les topologies isolées emploient un transformateur d'isolement fonctionnant à haute fréquence, c'est-à-dire isolement galvanique entre la sortie et l'entrée et le convertisseur qui présente une borne commune entre l'entrée et la sortie (Notez que dans le cas de l'isolement galvanique le rendement se verra affecté d'au moins 10%, ce qui est inadmissible dans nos cas qui sont des applications en énergie photovoltaïque), elles sont très employées souvent dans les alimentations à découpage. Ces topologies sont encore classées en trois catégories [19] et [20] :

- Convertisseur Zeta.
- Convertisseur Flyback.
- Convertisseur Forward.

3.6 Les convertisseurs DC-DC non isolés

3.6.1 Convertisseur dévolteur (Buck)

Un convertisseur dévolteur en anglais (Buck). Ce dernier qui est un convertisseur ne peut relier que deux sources de type différent courant/tension ou l'inverse. L'utilisation du Buck dans les systèmes de conversion photovoltaïque est tout à fait adéquate, étant donné que le générateur photovoltaïque est une source de courant continu, tandis que le récepteur (charge) obligatoirement, a la nature d'une source de tension. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure, où le rapport de conversion M change avec le rapport cyclique α du commutateur [19]. Leur schéma de principe est représenté dans la figure (3.3). Cette structure se comporte

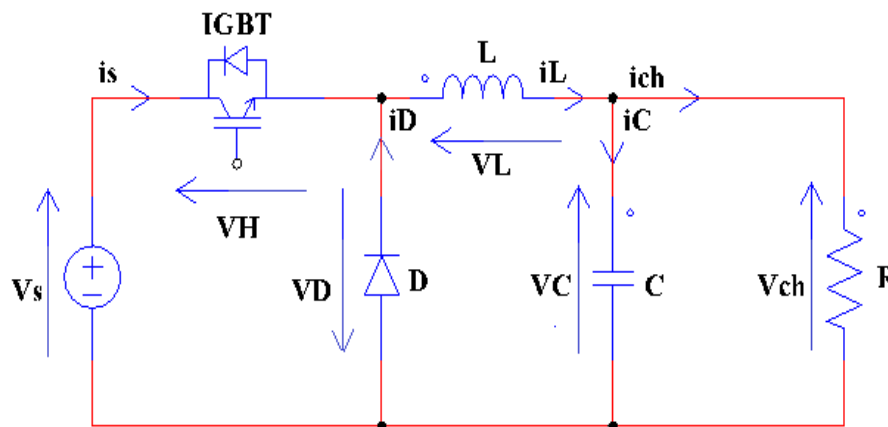


FIGURE 3.3 – Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur (Buck).

un interrupteur commandable à la fermeture et à l'ouverture transistor IGBT (H) en série avec la source, et une diode de roue libre (D) en parallèle avec la source permet d'assurer le passage du courant de la capacité directement vers la charge, et l'inductance de stockage (L) permet de lisser le courant appelé sur la source et pour conférer à l'ensemble le caractère source de courant.

La capacité (C) permet de limiter l'ondulation de tension en sortie et conférer à l'ensemble le caractère source de tension, et une résistance (R) comme charge.

Le tableau (3.1) résume les principales caractéristiques d'un convertisseur Buck, [20] et [21].

TABLE 3.1 – Les principales caractéristiques d'un convertisseur Buck, [20] et [21].

Réversibilité	Interrupteur	Rapport de transformation	Fréquence et puissance	Isolation galvanique
Non	IGBT	α	Haut, moyen	Non

3.6.2 Convertisseur survolteur (Boost)

Un convertisseur survolteur en anglais (Boost). Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure, où le rapport de conversion M change avec le rapport cyclique α du commutateur [19]. Son schéma de principe est donné par la figure (3.4). Cette structure se comporte

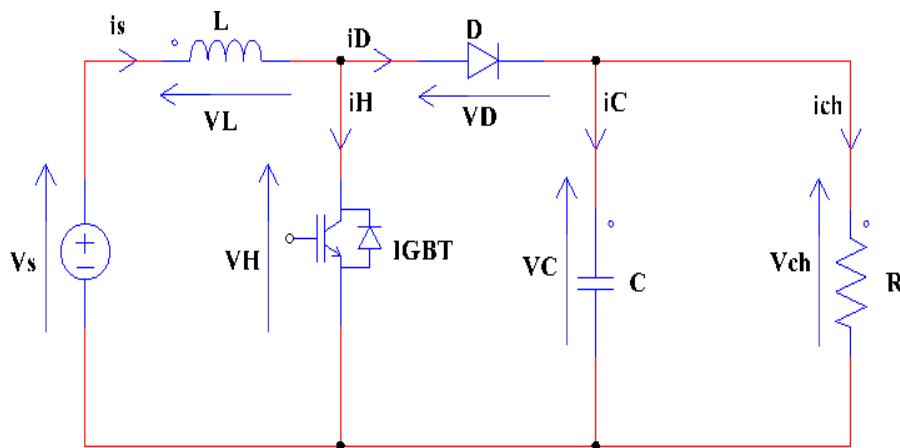


FIGURE 3.4 – Schéma de principe d'un convertisseur survolteur (Boost).

un interrupteur commandable à la fermeture et à l'ouverture transistor IGBT (H) en parallèle avec la source, et une diode de roue libre (D) en série avec la source permet d'assurer le passage du courant de la capacité directement vers la charge, et l'inductance de stockage (L) permet de lisser le courant appelé

sur la source et pour conférer à l'ensemble le caractère source de courant.

La capacité (C) permet de limiter l'ondulation de tension en sortie et conférer à l'ensemble le caractère source de tension, et une résistance (R) comme charge.

Le tableau (3.2) résume les principales caractéristiques d'un convertisseur Boost, [20] et [21].

TABLE 3.2 – Les principales caractéristiques d'un convertisseur Boost, [20] et [21].

Réversibilité	Interrupteur	Rapport de transformation	La Fréquence et puissance	Isolation galvanique
Non	IGBT	$\frac{1}{1-\alpha}$	Haut, moyen	Non

3.6.3 Convertisseur dévolteur-survolteur (Buck-Boost)

Un convertisseur dévolteur-survolteur en anglais (Buck-Boost), est une combinaison en cascade de deux convertisseurs précédents, mais de polarité inverse de celle d'entrée. Il présente donc une sorte d'un transformateur hybride pour une tension d'entrée/sortie continue. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure ou inférieure, où le rapport de conversion (transformation) M de tension entre la sortie et l'entrée est le produit de rapport de conversion deux convertisseurs précédents en cascade en fonction du rapport cyclique α , il change avec le rapport cyclique α du commutateur [19] et [22].

Où :

$$M = \frac{V_{ch}}{V_s} = \frac{i_s}{i_{ch}}; \alpha = \frac{t_{on}}{T}, 0 < \alpha < 1 \quad (3.1)$$

Avec :

M : Le rapport de conversion (transformation) entre l'entrée et la sortie du convertisseur.

α : Le rapport cyclique de fonctionnement du convertisseur, c'est le rapport entre le temps de conduction de l'interrupteur t_{on} et sa période de fonctionnement T .

3.6.3.1 Structure

Le schéma de principe d'un convertisseur Buck-Boost est représenté dans la figure (3.5). Cette structure se comporte un interrupteur commandable à la

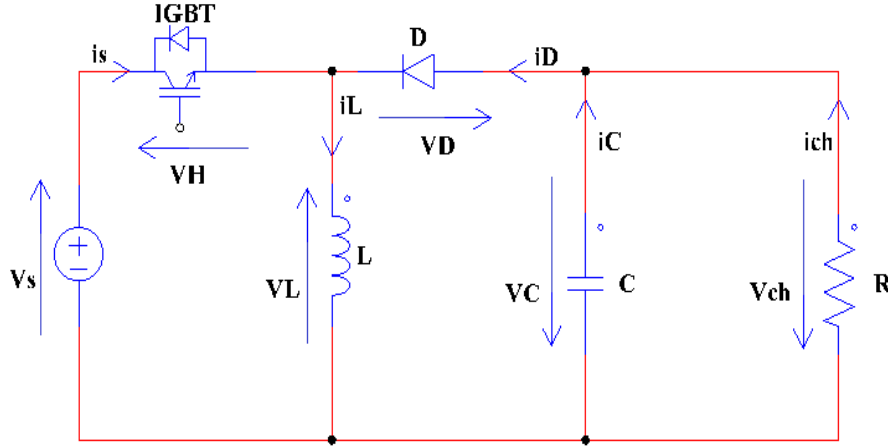


FIGURE 3.5 – Schéma de principe d'un convertisseur Buck-Boost.

fermeture et à l'ouverture transistor IGBT (H) et une diode de roue libre (D), les deux mise en série avec la source. La tension de la charge est de signe opposé à la tension de source, et l'inductance de stockage (L) permet de lisser le courant appelé sur la source et pour conférer à l'ensemble le caractère source de courant. La capacité (C) permet de limiter l'ondulation de tension en sortie et conférer à l'ensemble le caractère source de tension, et une résistance (R) comme charge.

3.6.3.2 Le principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un convertisseur Buck-Boost est basé sur l'ouverture et la fermeture des interrupteurs. L'ouverture et de fermeture de l'interrupteur permet le contrôle de l'échange d'énergie, l'interrupteur (H) commandé périodiquement sur une période T , donc on résulte deux phases de fonctionnement.

Phase 1 :

$$0 < \alpha < t_{on} = \alpha T$$

Le circuit de fonctionnement d'un convertisseur Buck-Boost dans la phase 1 est

donné par la figure (3.6), lorsque l'interrupteur (H) est fermé l'IGBT passant (ON), et la diode (D) polarisée en inverse, est bloquée, se comporte comme un interrupteur ouvert. Et la charge est alors déconnectée de l'alimentation. Le courant dans l'inductance est augmenté, donc l'inductance emmagasine de l'énergie c'est une phase de charge de la bobine [19] et [22].

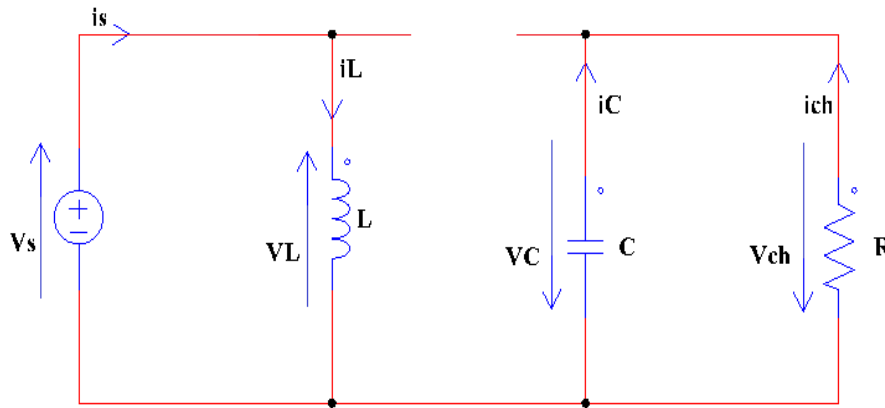


FIGURE 3.6 – Le circuit équivalent de fonctionnement d'un convertisseur Buck-Boost en phase 1.

En appliquant la loi de Kirchhoff à ce circuit on obtiendra les équations suivantes :

$$i_C(t) = C \times \frac{dV_{ch}(t)}{dt} = -i_{ch}(t) \quad (3.2)$$

$$V_L(t) = L \times \frac{di_L(t)}{dt} = V_s(t) \quad (3.3)$$

Phase 2 :

$$\alpha T \prec \alpha \prec T$$

Le circuit de fonctionnement d'un convertisseur Buck-Boost en phase 2 est donné par la figure (3.7), lorsque l'interrupteur (H) est ouvert l'IGBT bloquée (OFF) et la diode (D) devient passante. Le courant dans l'inductance (L) est diminué, l'inductance restitue son énergie vers la capacité et la charge à travers la diode c'est une phase de décharge de la bobine [19] et [22].

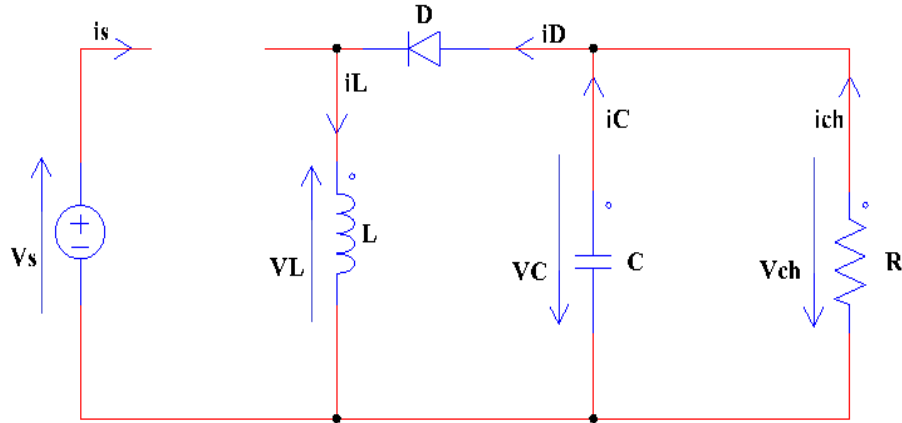


FIGURE 3.7 – Le circuit équivalent de fonctionnement d’un convertisseur Buck-Boost en phase 2.

En appliquant la loi de Kirchhoff à ce circuit on obtiendra les équations suivantes :

$$i_C(t) = C \times \frac{dV_{ch}(t)}{dt} = i_L(t) - i_{ch}(t) \quad (3.4)$$

$$V_L(t) = L \times \frac{di_L(t)}{dt} = -V_{ch}(t) \quad (3.5)$$

En mode de conduction continue, on a les formes d’onde des courants et des tensions dans la figure (3.8).

On a résoudre l’ensemble des équations précédentes (3.2), (3.3), (3.4) et (3.5), après les résultats du l’ensemble des équations et les formes d’onde des courants et des tensions. On déduit la tension de sortie moyenne :

$$V_{ch} = \frac{-\alpha}{1 - \alpha} \times V_s \quad (3.6)$$

Par définition, α est compris entre 0 et 1.

- si $\alpha < 0,5$, le montage abaisse la tension ;
- si $\alpha > 0,5$, le montage élève la tension.

Bien que ce montage permette d’élèver ou d’abaisser la tension, la tension de sortie est inversée par rapport à la tension d’entrée.

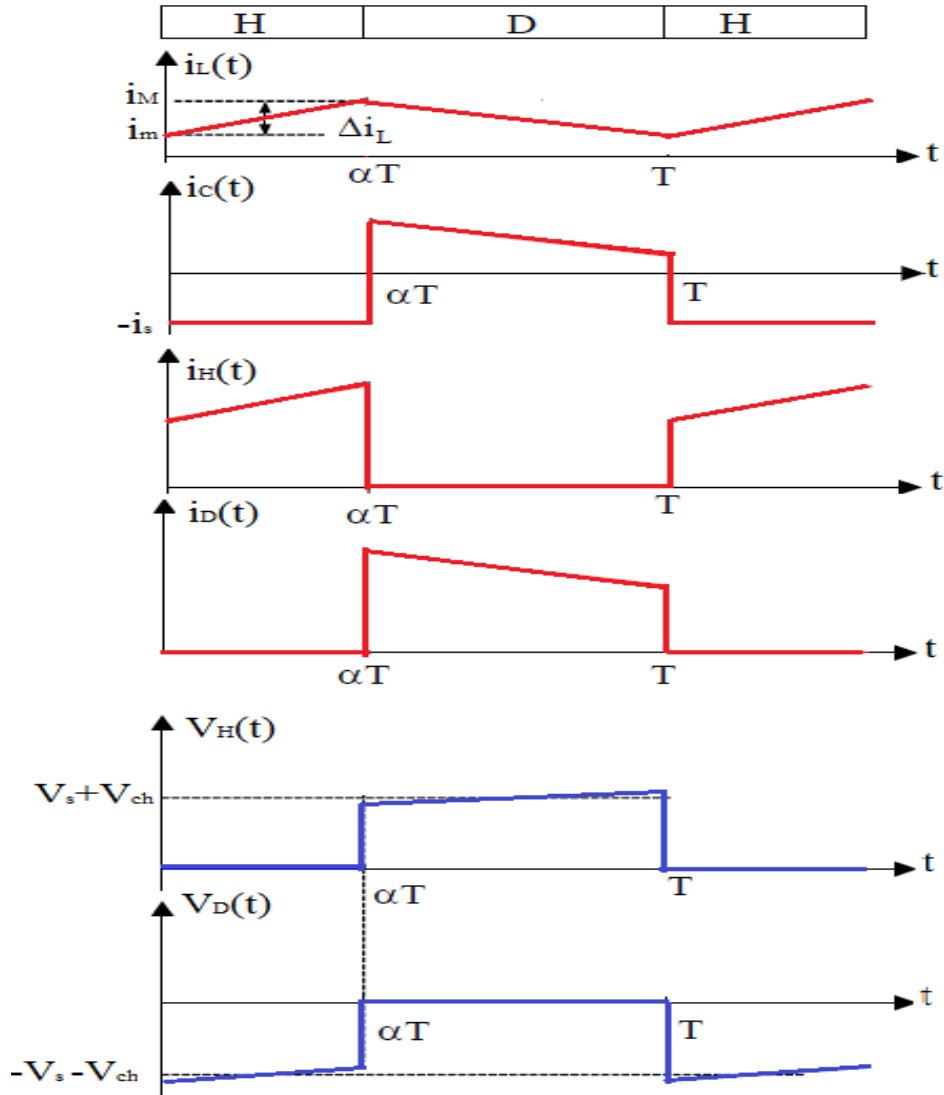


FIGURE 3.8 – Forme d'onde d'un convertisseur Buck-Boost, [22].

L'ondulation de courant dans l'inductance et l'ondulation de la tension de sortie :

$$\Delta i_L = i_M - i_m = \frac{\alpha \times V_s}{L \times f} \quad (3.7)$$

$$\Delta V_{ch} = \frac{\alpha \times i_s}{L \times f} = \frac{\alpha^2 \times V_s}{(1 - \alpha) \times R \times C \times f} \quad (3.8)$$

Le courant moyen traversant l'inductance en fonction de la puissance débitée par la source. On peut exprimer sa valeur moyenne en fonction de courant

moyen dans la charge et de rapport cyclique.

$$i_L = \frac{i_s}{1 - \alpha} \quad (3.9)$$

Le tableau (3.3) résume les principales caractéristiques d'un convertisseur Buck-Boost, [20] et [21].

TABLE 3.3 – Les principales caractéristiques d'un convertisseur Buck-Boost, [20] et [21].

Réversibilité	Interrupteur	Rapport de transformation	La Fréquence et puissance	Isolation galvanique
Oui	IGBT	$\frac{-\alpha}{(1-\alpha)}$	Haut, moyen	Non

3.6.3.3 Les avantages et les inconvénients

Le tableau (3.4) exprime les avantages et les inconvénients d'un convertisseur Buck-Boost, [23].

TABLE 3.4 – Les avantages et les inconvénients d'un convertisseur Buck-Boost, [23].

Avantages	Inconvénients
*Simple configuration.	*Grande courant d'entrée et sortie.
*Moins de composants à haute fiabilité.	*Polarité de sortie inverse.

On constate que, ce convertisseur peut être remplacé par une alimentation dite à stockage inductif. Ce dernier permet bien, selon la valeur du rapport cyclique α , d'élever ou d'abaisser la tension. Par contre nous pouvons tout de suite remarquer que la tension de sortie est inversée par rapport à la tension d'entrée.

3.7 Les convertisseurs DC-DC isolés

3.7.1 Convertisseur Zeta

Un convertisseur Zeta est un convertisseur isolé, mais de polarité non inverse de celle d'entrée. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure ou inférieure, où le rapport de conversion (transformation) M de tension entre la sortie et l'entrée du convertisseur change avec le rapport cyclique α du commutateur [24].

3.7.1.1 Structure

Le schéma de principe d'un convertisseur Zeta est représentée dans la figure (3.9), cette structure se comporte un interrupteur commandable à la fermeture et à l'ouverture transistor IGBT (H) et une diode de roue libre (D), et deux inductances (L_1 et L_2) sert à accumuler l'énergie ; elles représentent des sources de courant et permettent de ne pas relier directement ensemble deux sources de même nature. Deux capacités (C_1 et C_2) jouent le rôle de filtre, et une résistance (R) comme charge.

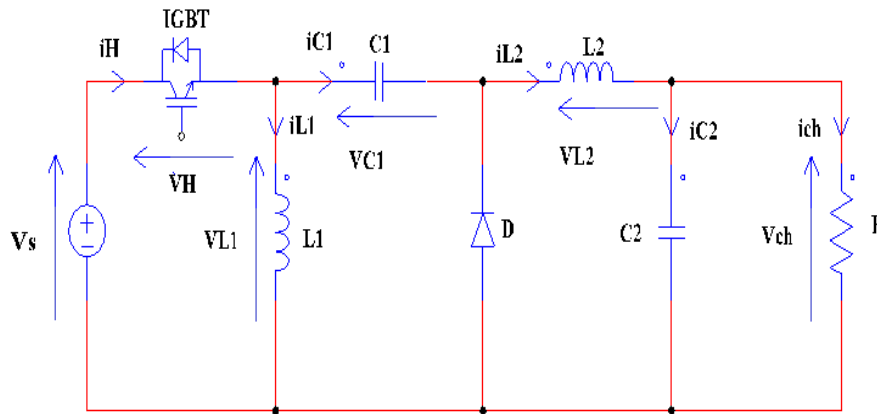


FIGURE 3.9 – Schéma de principe d'un convertisseur Zeta.

3.7.1.2 Le principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un convertisseur Zeta est basé sur l'ouverture et la fermeture des interrupteurs. L'ouverture et de fermeture de l'interrupteur

permet le contrôle de l'échange d'énergie, l'interrupteur (H) commandé périodiquement sur une période T , donc on résulte deux phases de fonctionnement.

Phase 1 :

$$0 < \alpha < t_{on} = \alpha T$$

Le circuit de fonctionnement d'un convertisseur Zeta dans la phase 1 est donné par la figure (3.10), lorsque l'interrupteur (H) est fermé l'IGBT passant (ON), et la diode (D) polarisée en inverse, est bloquée, se comporte comme un interrupteur ouvert. Le courant dans l'inductance (L_1) est augmenté, donc l'inductance (L_1) emmagasine de l'énergie. Le condensateur (C_1) transfert son énergie à l'inductance (L_2) ainsi qu'à la charge R ; c'est une phase de charges des bobines [24].

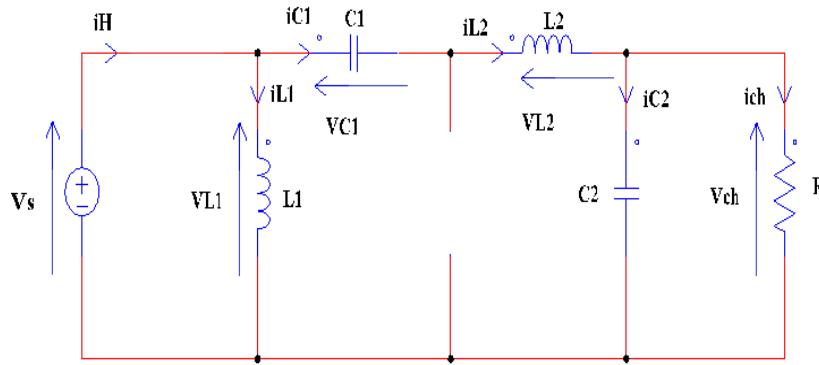


FIGURE 3.10 – Le circuit équivalent de fonctionnement d'un convertisseur Zeta en phase 1.

En appliquant la loi de Kirchhoff à ce circuit on obtiendra les équations suivantes :

$$V_{L_1} = L_1 \times \frac{di_{L_1}}{dt} = V_s \tag{3.10}$$

$$V_{L_2} = L_2 \times \frac{di_{L_2}}{dt} = -V_{ch} - V_{C_1} \tag{3.11}$$

Phase 2 :

$$\alpha T < \alpha < T$$

Le circuit de fonctionnement d'un convertisseur Zeta en phase 2 est donné par

la figure (3.11), lorsque l'interrupteur (H) est ouvert l'IGBT bloquée (OFF) et la diode (D) devient passante. Le courant dans l'inductance (L_2) est diminué, l'inductance (L_2) décharge son énergie au moyen de la capacité (C_1); c'est une phase de décharge des bobines [24].

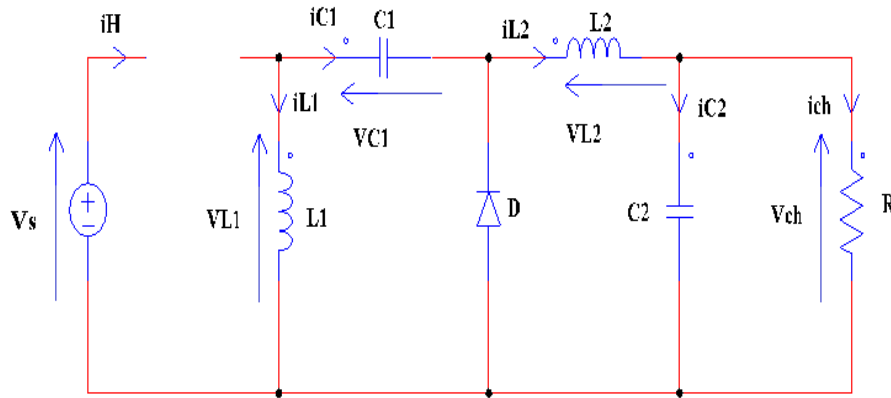


FIGURE 3.11 – Le circuit équivalent de fonctionnement d'un convertisseur Zeta en phase 2.

En appliquant la loi de Kirchhoff à ce circuit on obtiendra les équations suivantes :

$$V_{L_1} = L_1 \times \frac{di_{L_1}}{dt} = V_{C_1} \quad (3.12)$$

$$V_{L_2} = L_2 \times \frac{di_{L_2}}{dt} = -V_{ch} \quad (3.13)$$

En mode de conduction continue, on a les formes d'onde des courants et des tensions dans la figure (3.12).

Le rapport de conversion (transformation) entre l'entrée et la sortie du convertisseur Zeta.

$$K = \frac{V_{ch}}{V_s} = \frac{\alpha}{(1 - \alpha)} \quad (3.14)$$

Donc :

La tension de sortie moyenne est :

$$V_{ch} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \times V_s \quad (3.15)$$

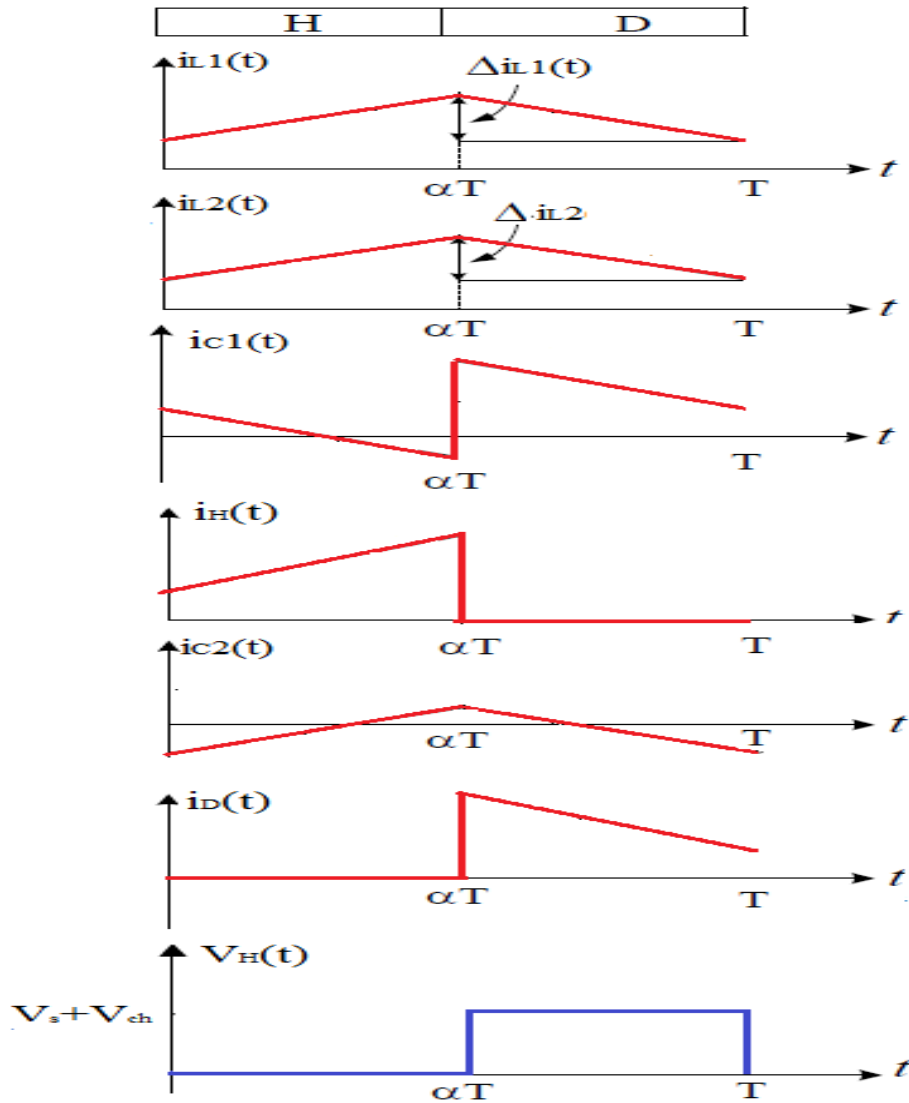


FIGURE 3.12 – Forme d’onde d’un convertisseur Zeta, [24].

Par définition, α est compris entre 0 et 1.

- si $\alpha < 0,5$, le montage abaisse la tension ;
- si $\alpha > 0,5$, le montage élève la tension.

Bien que ce montage permette d’élever ou d’abaisser la tension, la tension de sortie est inversée par rapport à la tension d’entrée.

Le tableau (3.5) résume les principales caractéristiques d’un convertisseur Zeta, [20] et [21].

TABLE 3.5 – Les principaux caractéristiques d’un convertisseur Zeta, [20] et [21].

Réversibilité	Interrupteur	Rapport de transformation	La Fréquence et puissance	Isolation galvanique
Oui	IGBT	$\frac{\alpha}{(1-\alpha)}$	Très haut, petit	Oui

3.7.1.3 Les avantages et les inconvénients

Le tableau (3.6) exprime les avantages et les inconvénients d’un convertisseur Zeta, [23].

TABLE 3.6 – Les avantages et les inconvénients d’un convertisseur Zeta, [23].

Avantages	Inconvénients
*Petite tension de (C_1).	*Grand tension et courant de IGBT ; (D).
*Polarité non inverse.	*Grand taille.
*Zéro-ondulation de courant de sorties par couplage de deux inductances.	*Plus élevé poids.

On constate que, ce convertisseur peut être remplacé par une alimentation dite à stockage capacitif. Ce dernier permet bien, selon la valeur du rapport cyclique α , d’élever ou d’abaisser la tension. Nous pouvons tout de suite remarquer que la tension de sortie est non inversée par rapport à la tension d’entrée.

3.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous allons donc tout d’abord plus intéresser au convertisseur. Nous avons donné une vision globale sur les convertisseurs DC-DC (hacheur) tel que définition, réversibilité ou non, les interrupteurs utilisé et les différents types soit isolé ou non isolé. Ensuite, nous avons étudié et expliqué le fonctionnement de deux structures, une à stockage inductif (Buck-Boost) et l’autre à stockage capacitif (Zeta), puis les principaux caractéristiques des quatre convertisseurs. Enfin, les avantages et les inconvénients des

deux convertisseurs précédents. Buck-Boost et Zeta ont une point commune, ils fonctionnent selon la valeur du rapport cyclique α comme élévateur ou bien comme abaisseur, mais le premier non isolé et de polarité inverse comme Cuk, le secondaire isolé et de polarité non inverse comme (SEPIC non isolé).

Chapitre 4

Optimisation de fonctionnement d'un électrolyseur PEM

4.1 Introduction

Un programme a été réalisé en MATLAB/Simulink étude deux convertisseurs Buck-Boost et Zeta ; qui ont des performances et des structures différentes, mais les deux montages permettent selon la valeur du rapport cyclique α d'élever ou d'abaisser la tension de sortie. Un panneau photovoltaïque peut fonctionner dans une large gamme de tension et de courant de sorties, mais il ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de tension. L'optimisation d'un système (panneau PV-électrolyseur PEM) consiste à réaliser le point maximale ou la puissance maximale en permanence en agissant de façon automatique sur la charge vue (électrolyseur PEM) par la source (panneau photovoltaïque), cette adaptation de charge dans le principe s'effectue en générale a l'aide d'un convertisseur statique DC-DC. Ce dernier assure le couplage entre le panneau photovoltaïque (source) et l'électrolyseur PEM (charge), il permet aussi la conversion d'énergie entre eux et le contrôle de la puissance électrique au moyen de chercher le point de fonctionnement optimum (MPPT), en forçant que le panneau photovoltaïque délivrer sa puissance maximale ; on a choisit un convertisseur de type Buck-Boost.

4.2 Convertisseur Buck-Boost

Le schéma bloc d'un convertisseur Buck-Boost réalisé en MATLAB/Simulink est montré par la figure (5.19) dans l'annexe A.

4.2.1 Fonctionnement Boost : $\alpha = 0,65 \succ 0,5$

D'après la réalisation du schéma bloc d'un convertisseur Buck-Boost, le choix de la valeur du rapport cyclique $\alpha = 0,65$; les résultats obtenus sont ci-dessous :

La valeur de la tension moyenne aux borne de la charge $V_m = 18,59V$ est supérieure à la tension d'entrée V_s ; dans ce cas, le convertisseur est un élévateur de tension.

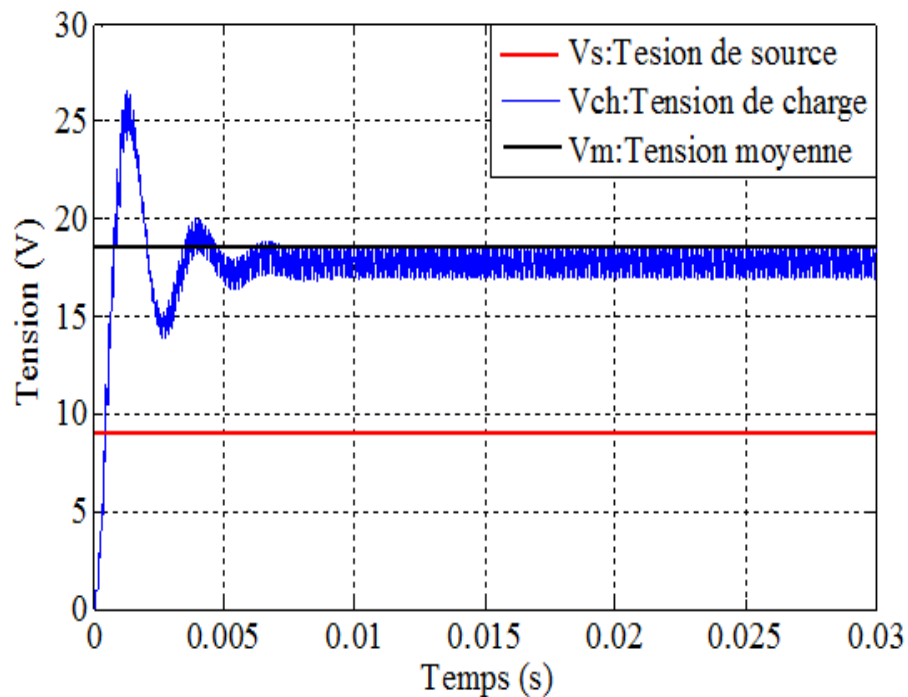


FIGURE 4.1 – Les allures des tensions fonctionnement Boost.

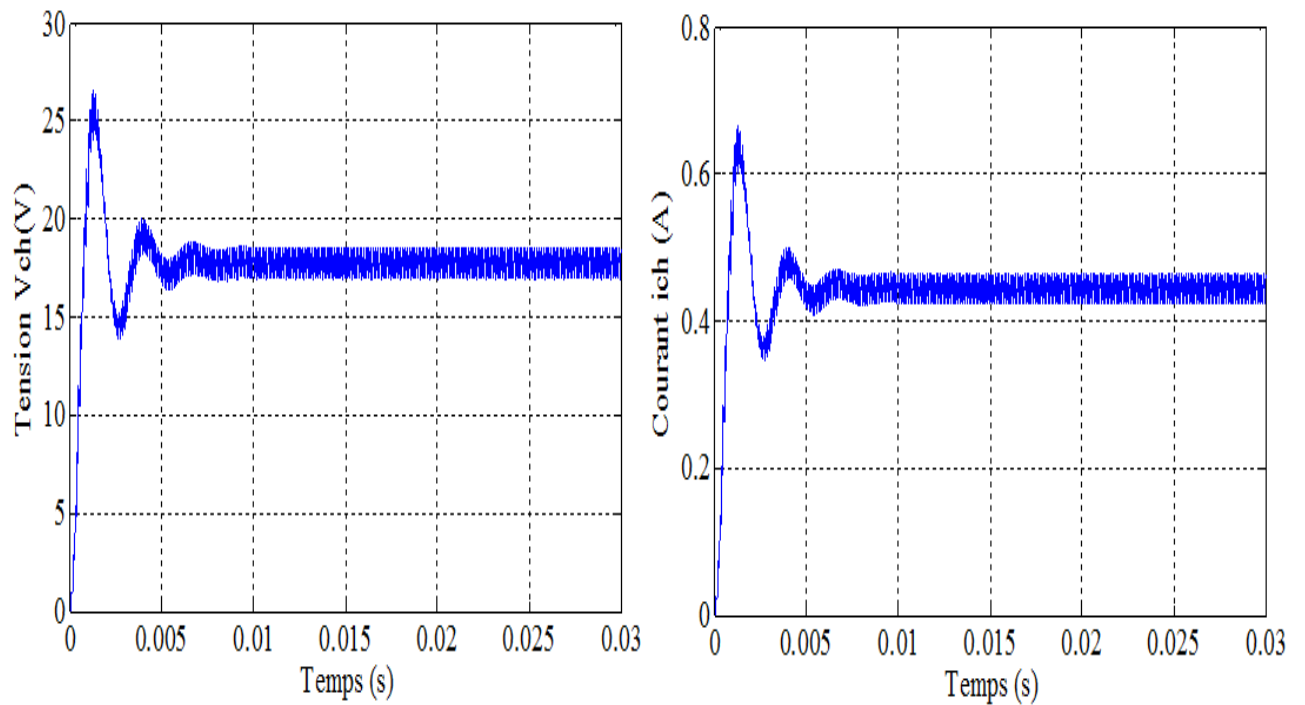


FIGURE 4.2 – Les allures de tension et de courant du charge fonctionnement Boost.

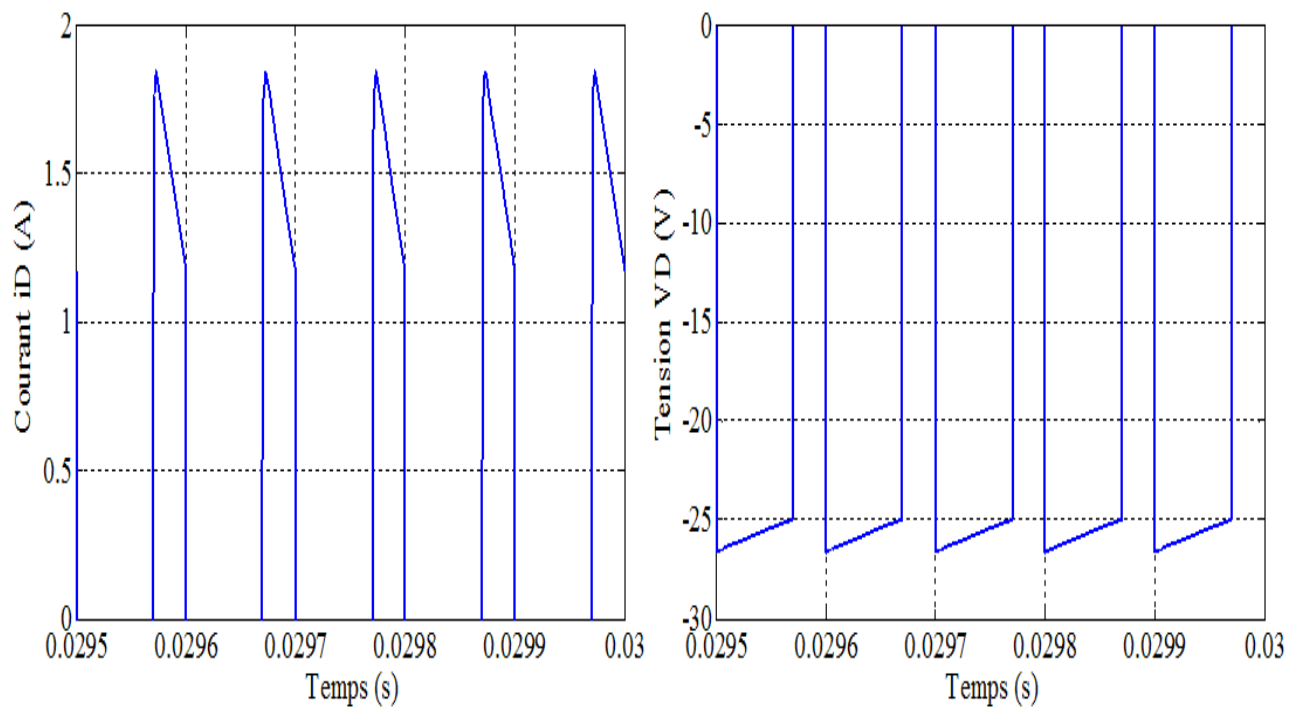


FIGURE 4.3 – Les allures de courant et de tension du diode fonctionnement Boost.

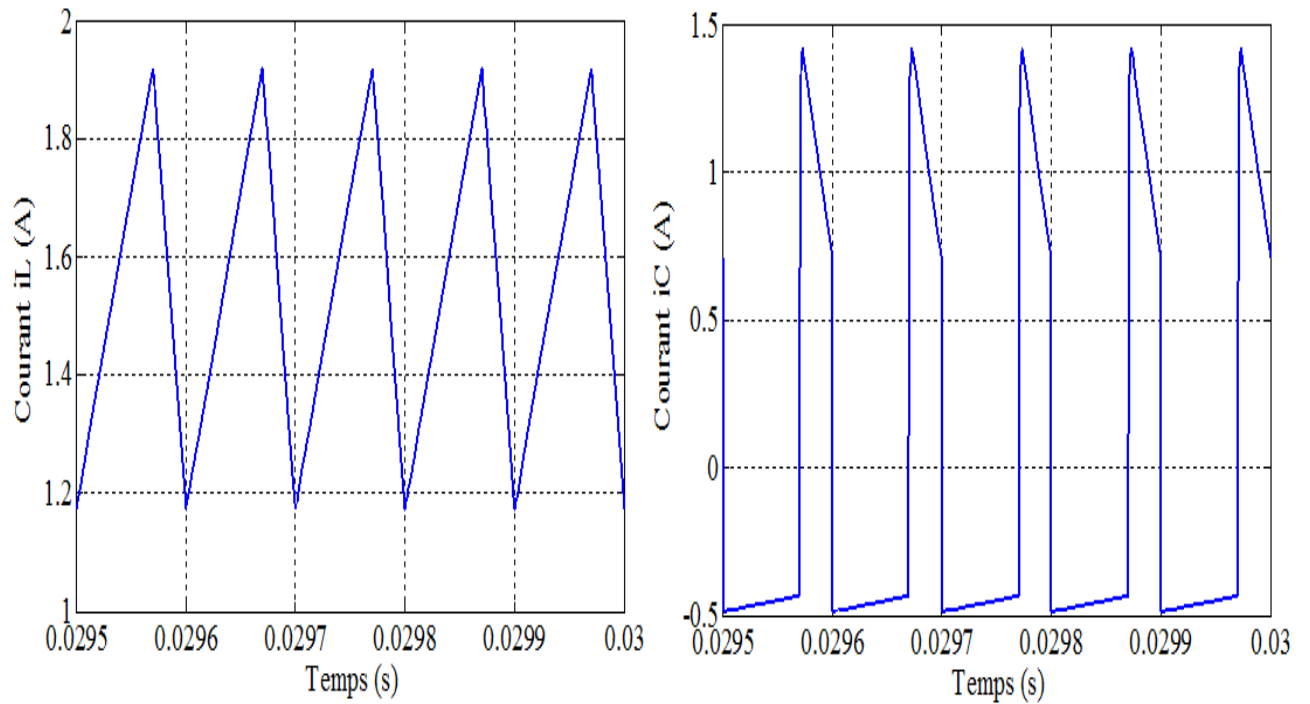


FIGURE 4.4 – Les allures de courant d’inductance et du capacité fonctionnement Boost.

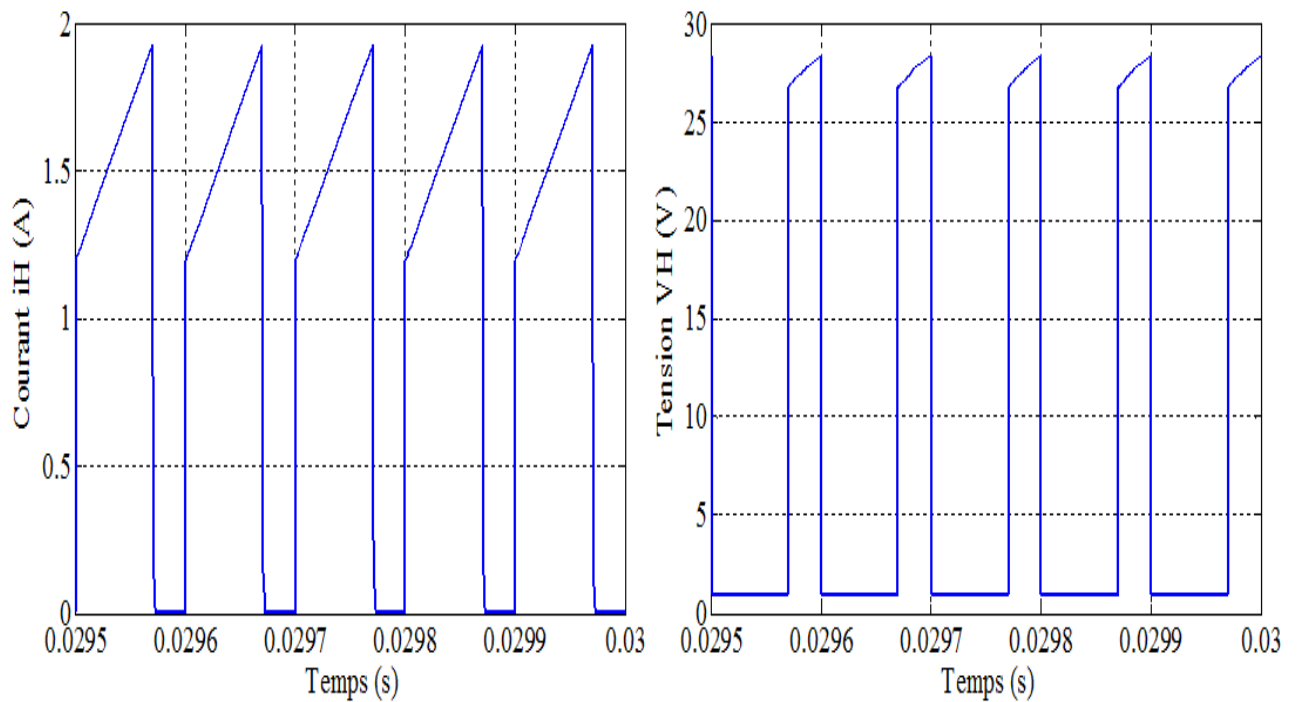


FIGURE 4.5 – Les allures de courant et de tension d’IGBT fonctionnement Boost.

Les résultats obtenus ci-dessus sont similaires aux résultats théoriques précédentes dans la figure (3.8) dans le chapitre 3. Ces résultats expliquent le fonctionnement de convertisseur Buck-Boost en mode continu. C'est-à-dire le courant i_L traversant l'inductance ne s'annule jamais. En conduction continue, la quantité d'énergie demandée par la charge est assez forte pour être transférée dans un temps plus court qu'une période de commutation. Dans ce cas, le courant traversant l'inductance ne s'annule jamais pendant une période.

4.2.2 Fonctionnement Buck : $\alpha = 0,35 < 0,5$

Dans ce cas, la valeur du rapport cyclique $\alpha = 0,35$; les résultats obtenus sont ci-dessous :

La valeur de la tension moyenne aux borne de la charge $V_m = 4,75V$ inférieure à la tension d'entrée V_s ; dans ce cas, le convertisseur est un abaisseur de tension.

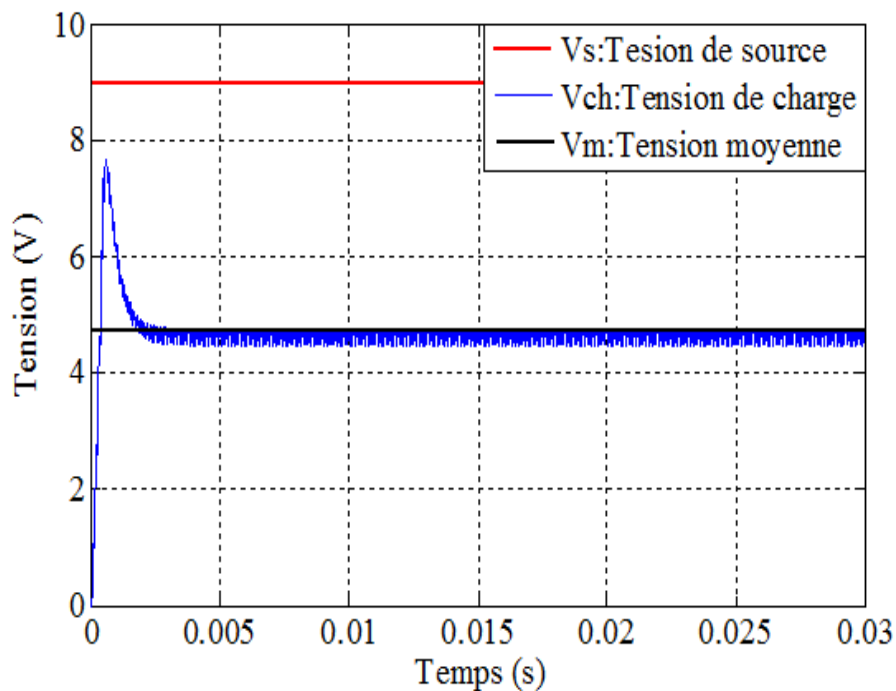


FIGURE 4.6 – Les allures des tensions fonctionnement Buck.

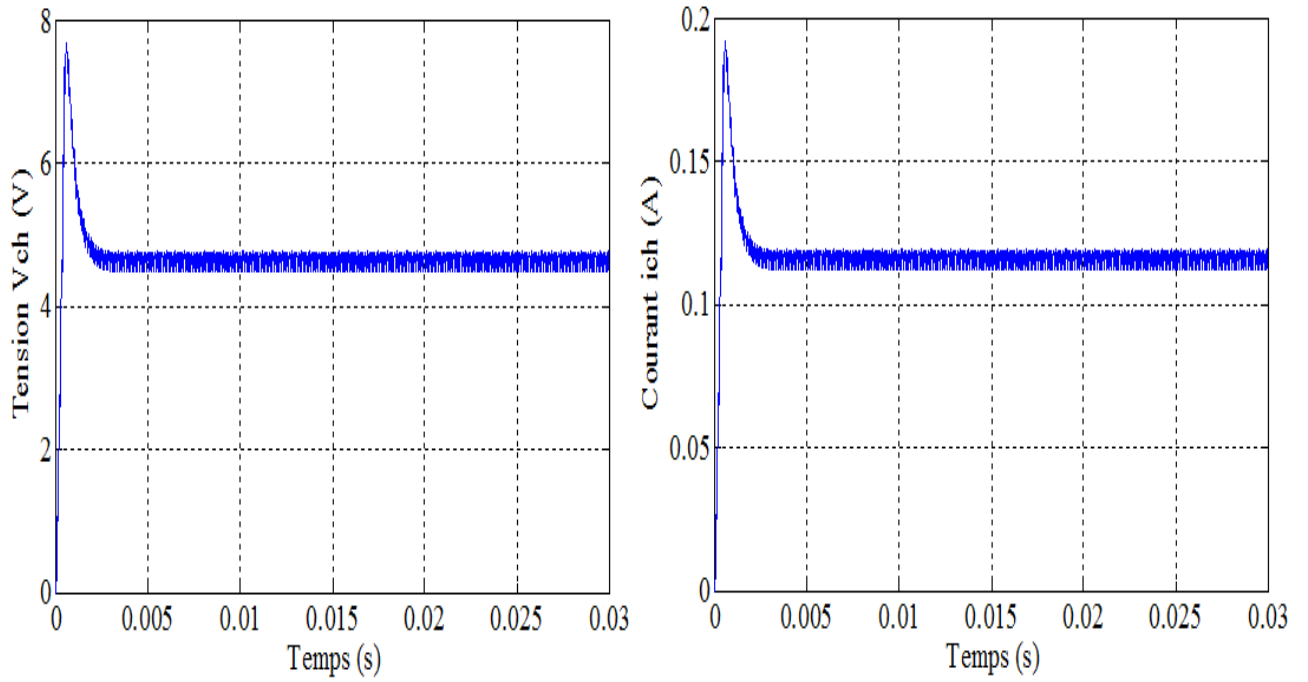


FIGURE 4.7 – Les allures de tension et de courant du charge fonctionnement Buck.

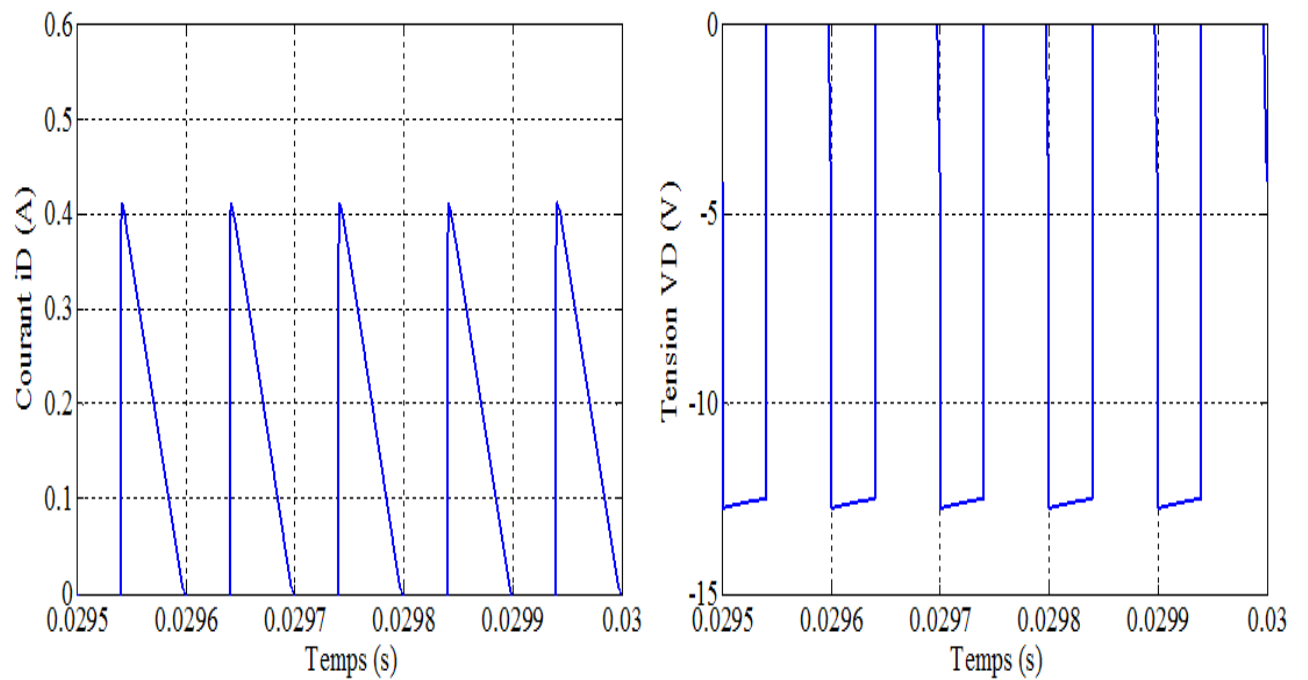


FIGURE 4.8 – Les allures de courant et de tension du diode fonctionnement Buck.

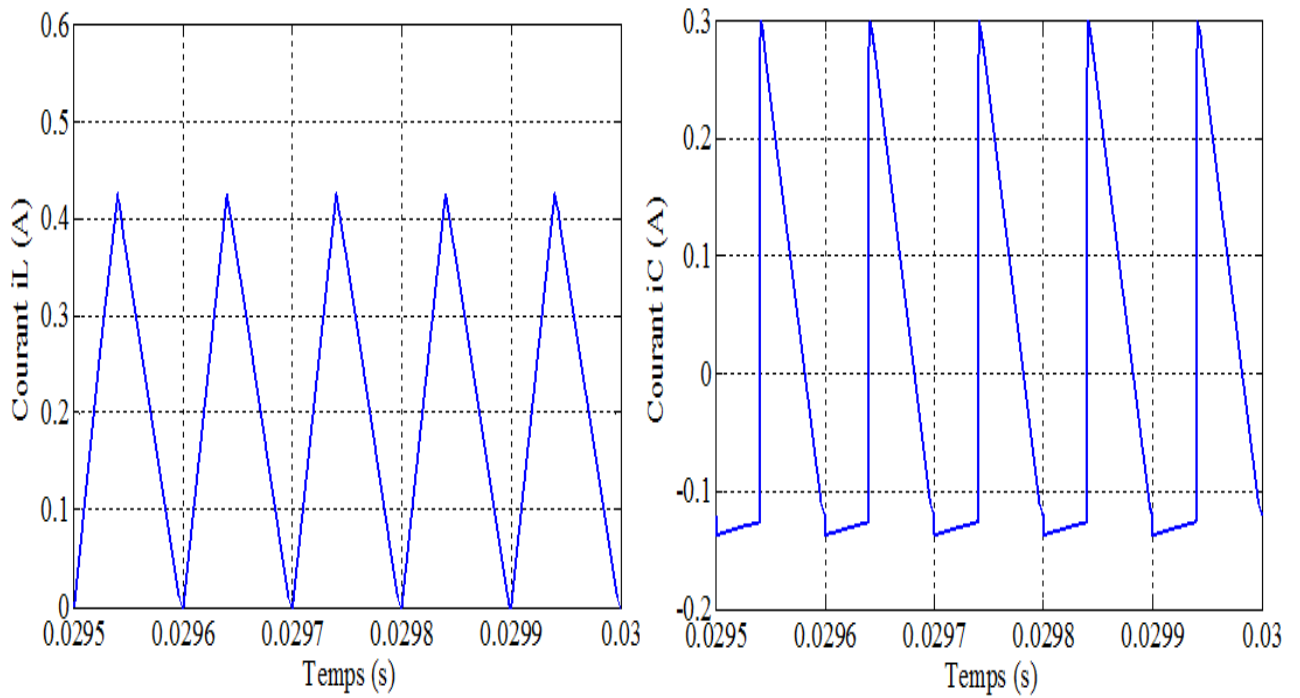


FIGURE 4.9 – Les allures de courant d’inductance et du capacité fonctionnement Buck.

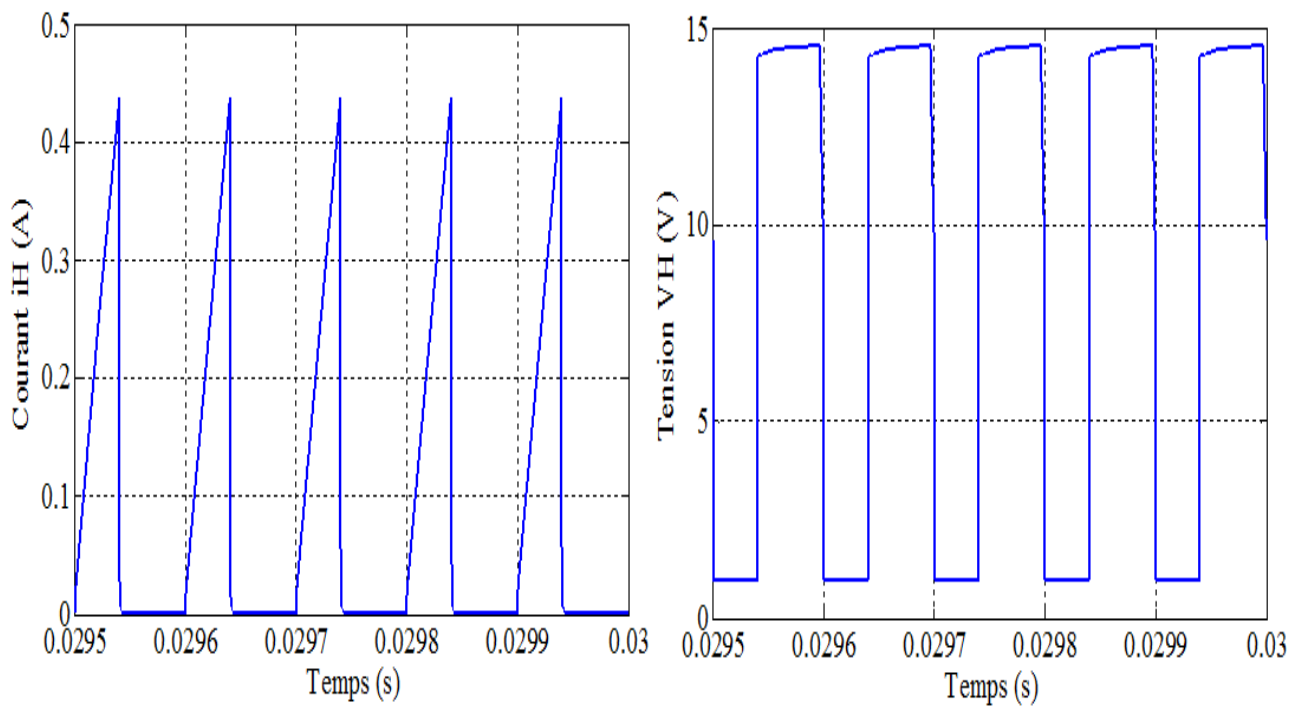


FIGURE 4.10 – Les allures de courant et de tension d’IGBT fonctionnement Buck.

Les résultats ci-dessus expliquent le fonctionnement de convertisseur Buck-Boost en mode discontinue critique $i_m = 0$. C'est-à-dire le courant i_L traversant l'inductance s'annule. En conduction discontinue, la quantité d'énergie demandée par la charge est assez faible pour être transférée dans un temps plus court qu'une période de commutation. Dans ce cas, le courant traversant l'inductance s'annule pendant une partie de la période.

4.3 Convertisseur Zeta

Le schéma bloc d'un convertisseur Zeta réalisé en Simulink est montré par la figure (5.20) dans l'annexe B.

4.3.1 Fonctionnement Boost : $\alpha = 0,65 \succ 0,5$

D'après la réalisation du schéma bloc d'un convertisseur Zeta, le choix de la valeur du rapport cyclique $\alpha = 0,65$; les résultats obtenus sont ci-dessous :

La valeur de la tension moyenne aux borne de la charge $V_m = 18,06V$ supérieure à la tension d'entrée V_s ; dans ce cas, le convertisseur est un élévateur de tension.

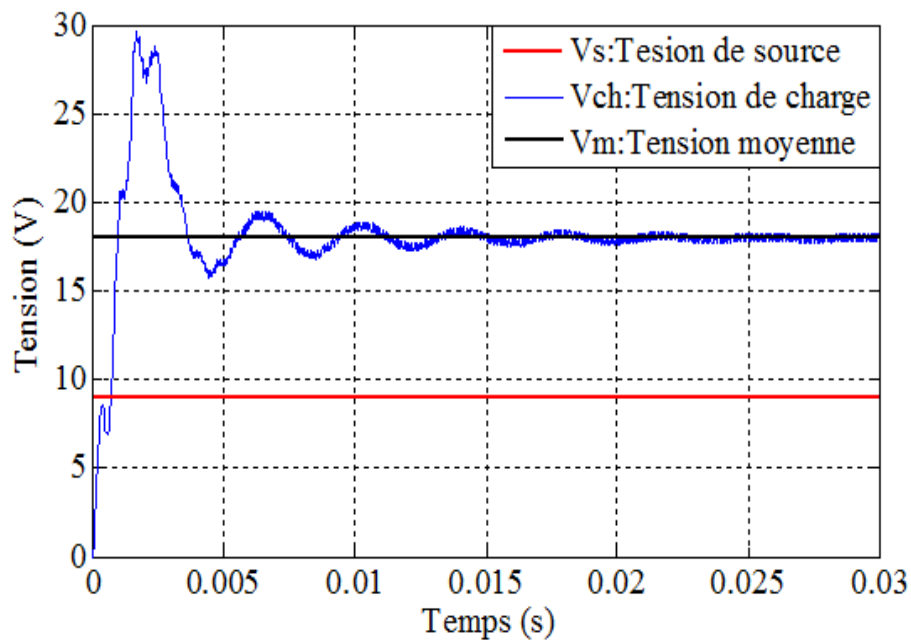


FIGURE 4.11 – Les allures des tensions fonctionnement Boost.

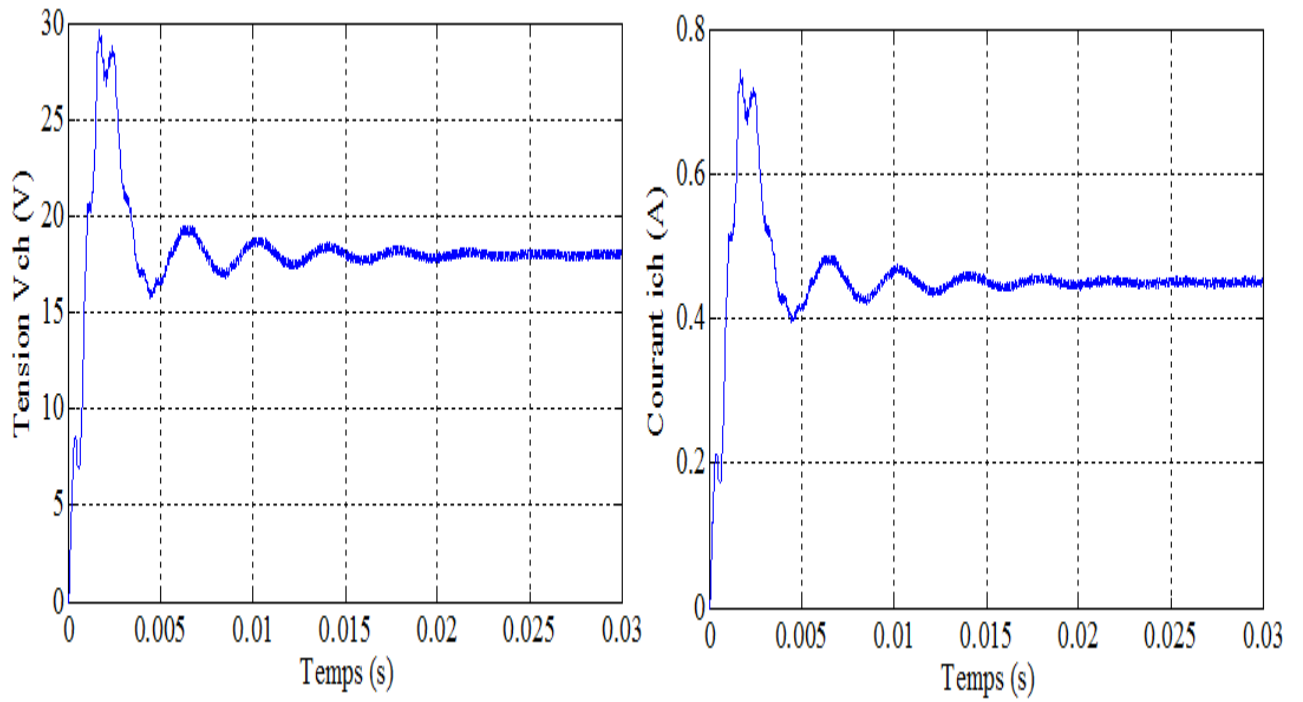


FIGURE 4.12 – Les allures de tension et de courant du charge fonctionnement Boost.

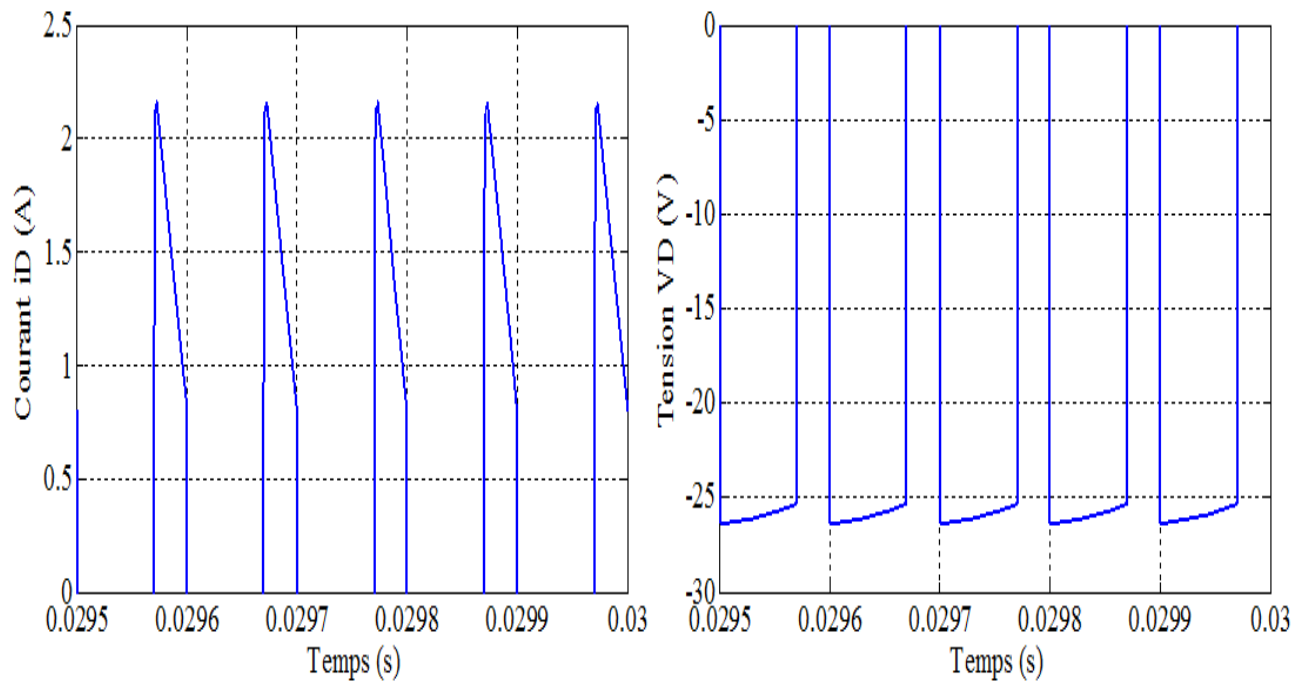


FIGURE 4.13 – Les allures de courant et de tension du diode fonctionnement Boost.

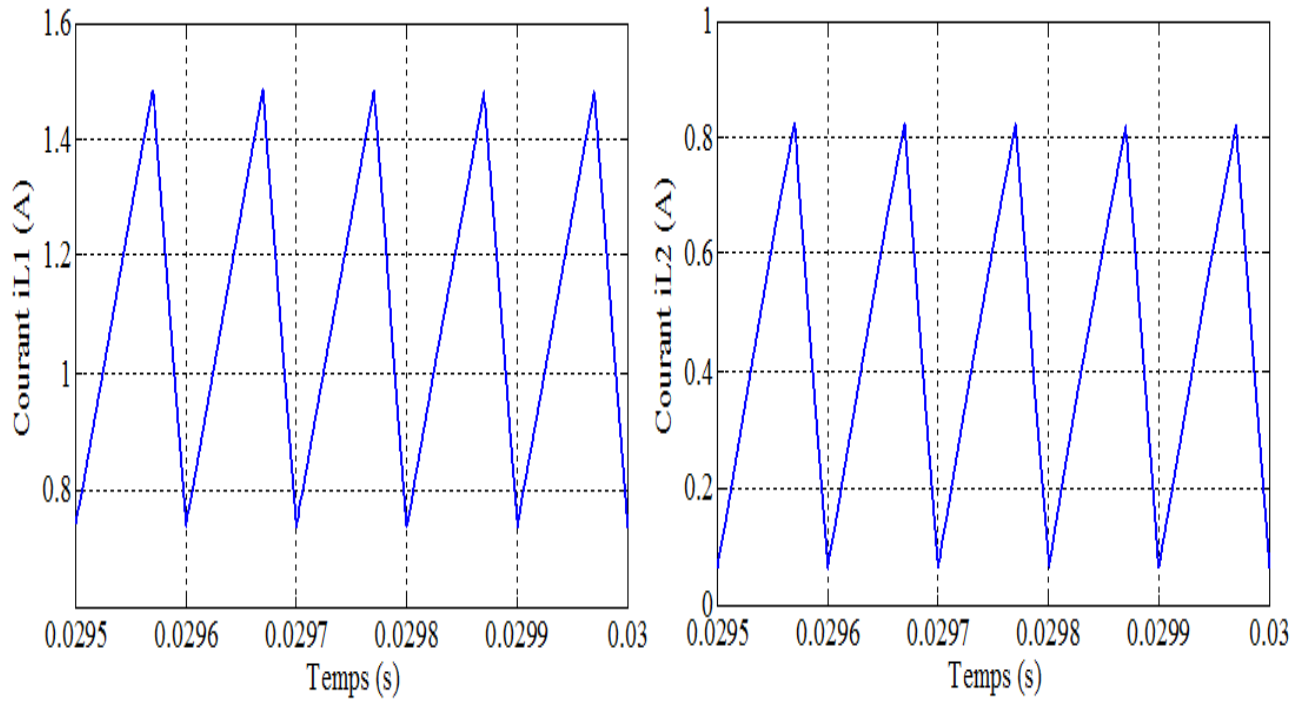


FIGURE 4.14 – Les allures des courants des inductances fonctionnement Boost.

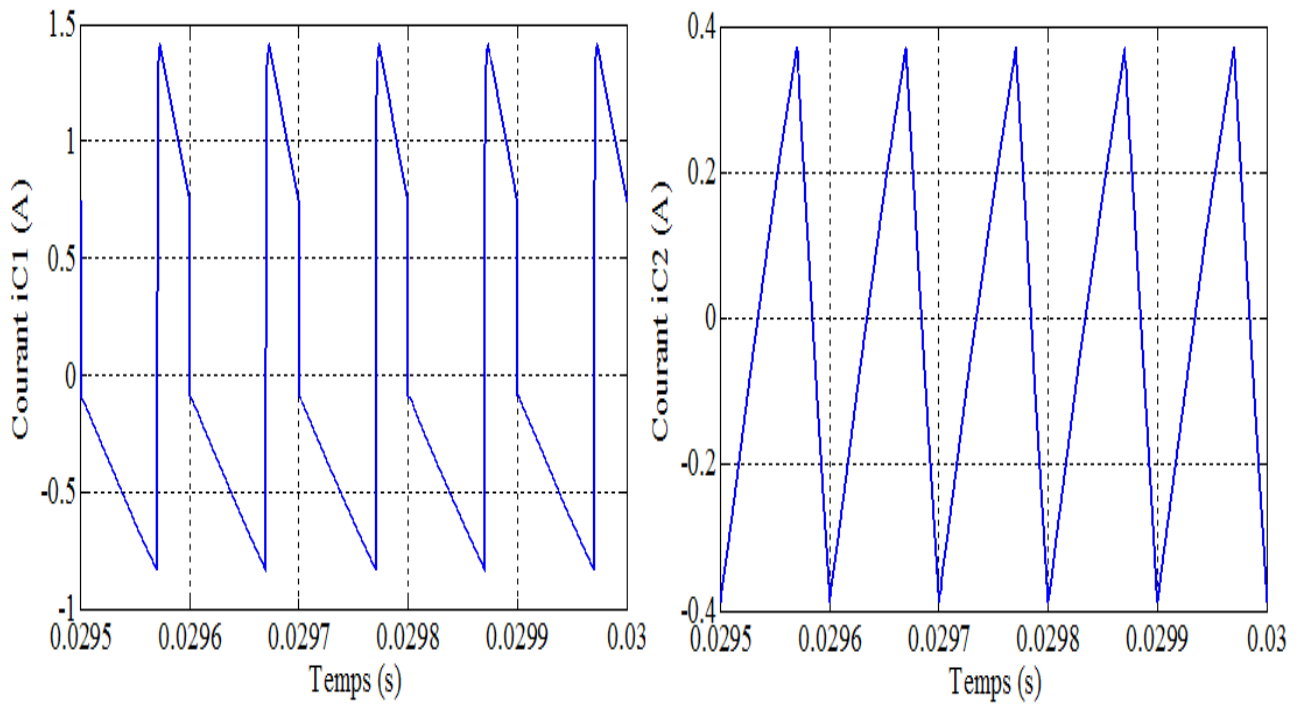


FIGURE 4.15 – Les allures des courants des capacités fonctionnement Boost.

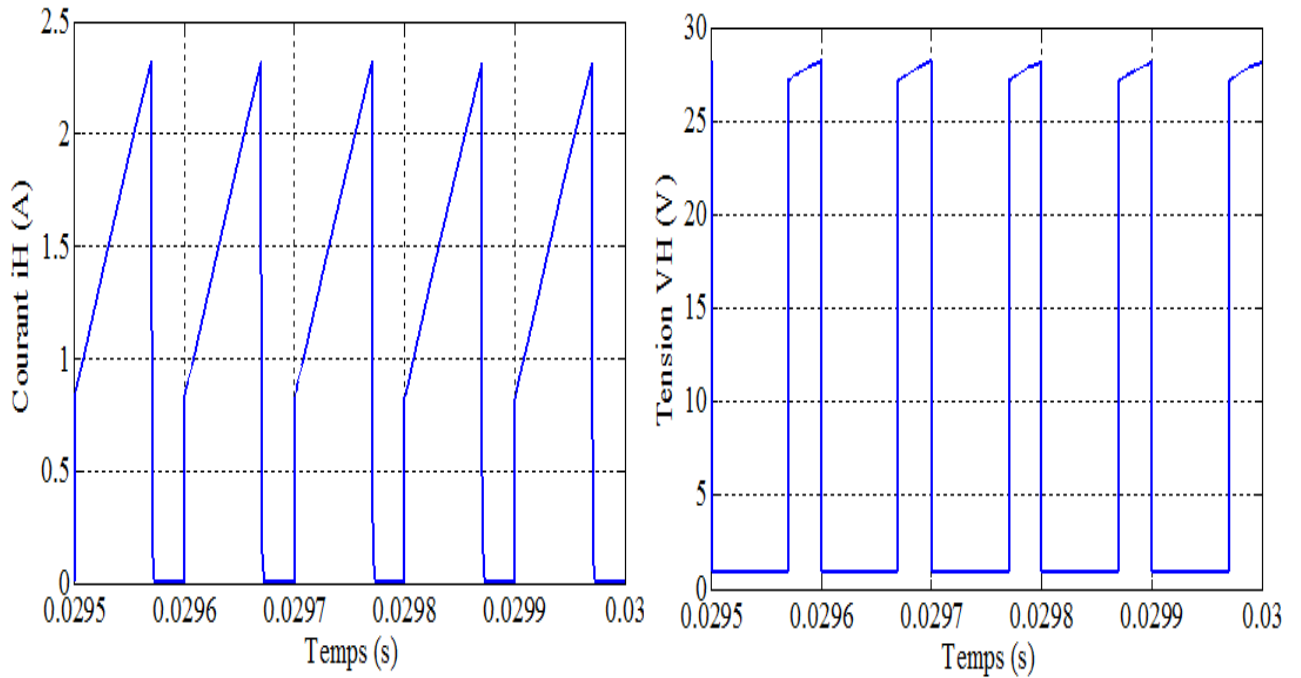


FIGURE 4.16 – les allures de courant et de tension d’IGBT fonctionnement Boost.

Les résultats obtenus ci-dessus sont similaires aux résultats théoriques précédentes dans la figure (3.12) dans le chapitre 3. Ces résultats expliquent le fonctionnement de convertisseur Zeta en mode continue. C’est-à-dire les courants i_{L_1} et i_{L_2} traversant les inductances ne s’annulent jamais. En conduction continue, la quantité d’énergie demandée par la charge est assez forte pour être transférée dans un temps plus court qu’une période de commutation. Dans ce cas, les courants traversants les inductances ne s’annulent jamais pendant une période.

4.3.2 Fonctionnement Buck : $\alpha = 0,35 < 0,5$

Dans ce cas, la valeur du rapport cyclique $\alpha = 0,35$; les résultats obtenus ci-dessous :

La valeur de la tension moyenne aux borne de la charge $V_m = 6,76V$ inférieure à la tension d’entrée V_s ; dans ce cas, le convertisseur est un abaisseur de tension.

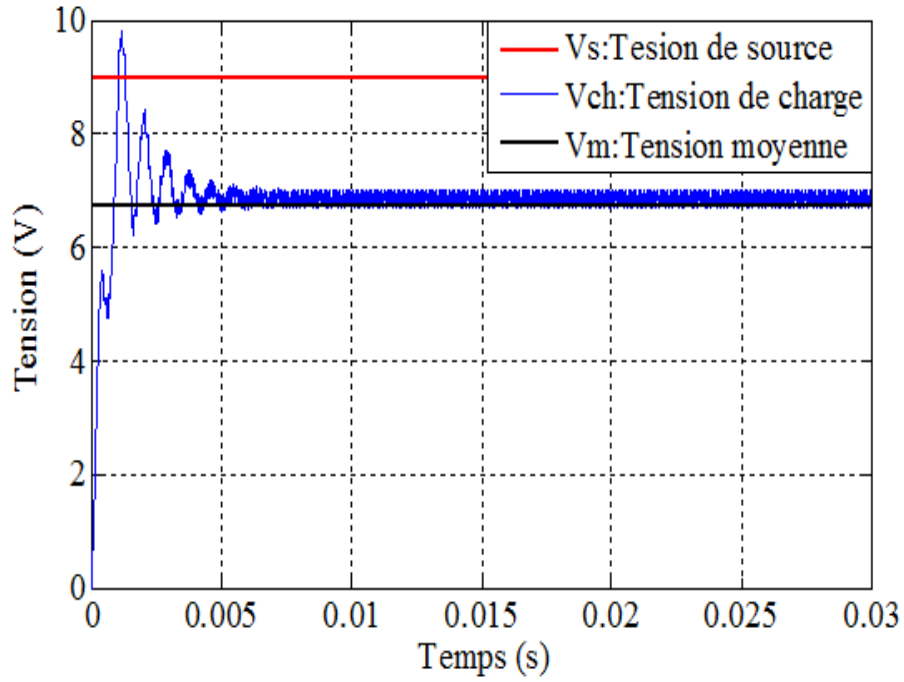


FIGURE 4.17 – Les allures des tensions fonctionnement Buck.

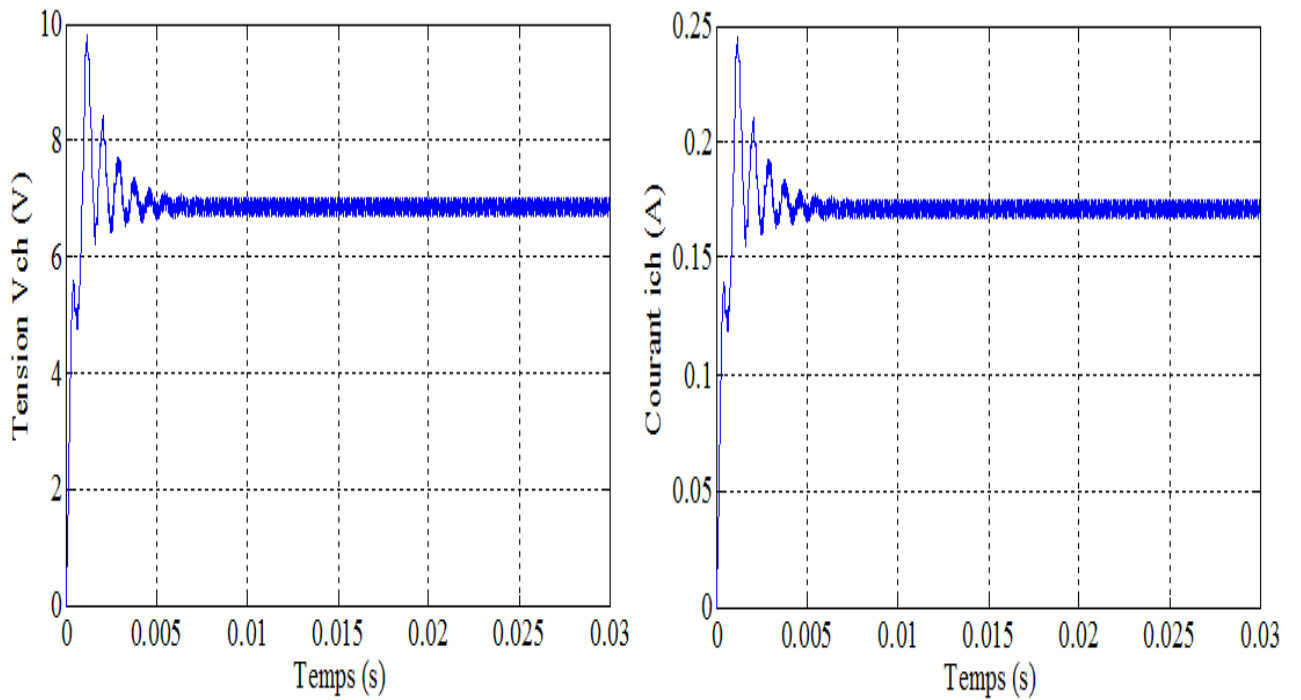


FIGURE 4.18 – Les allures de tension et de courant du charge fonctionnement Buck.

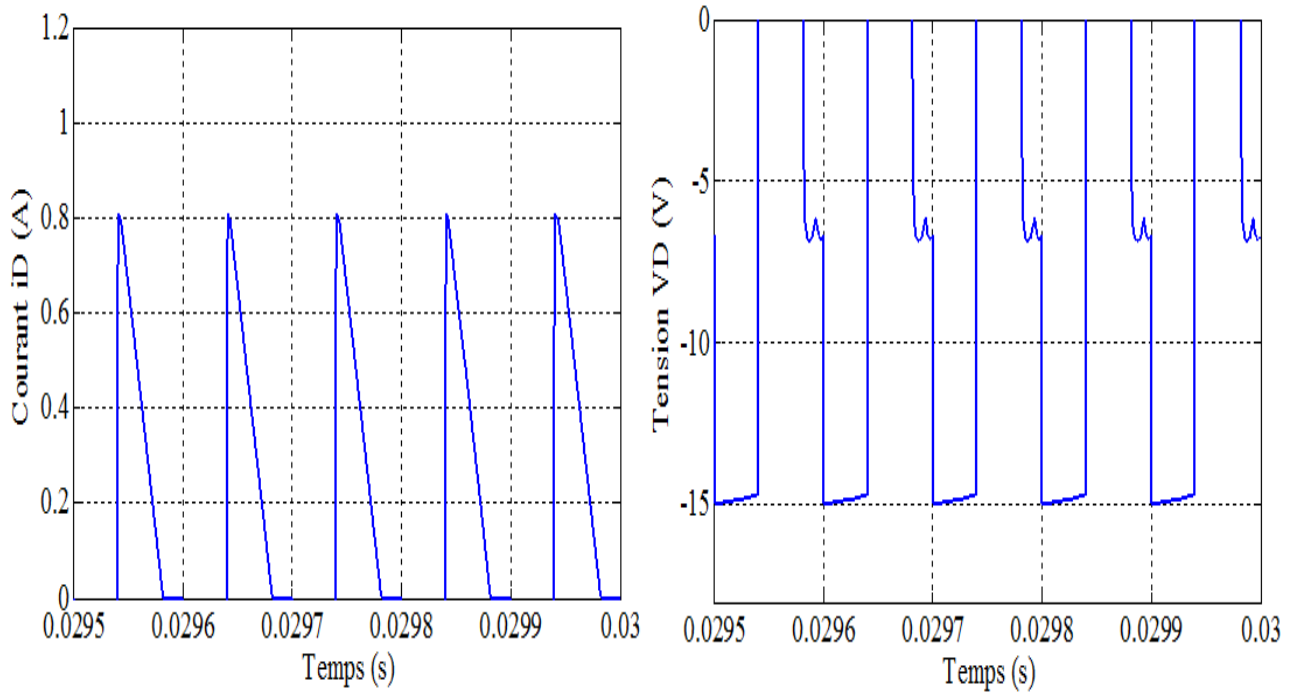


FIGURE 4.19 – Les allures de courant et de tension du diode fonctionnement Buck.

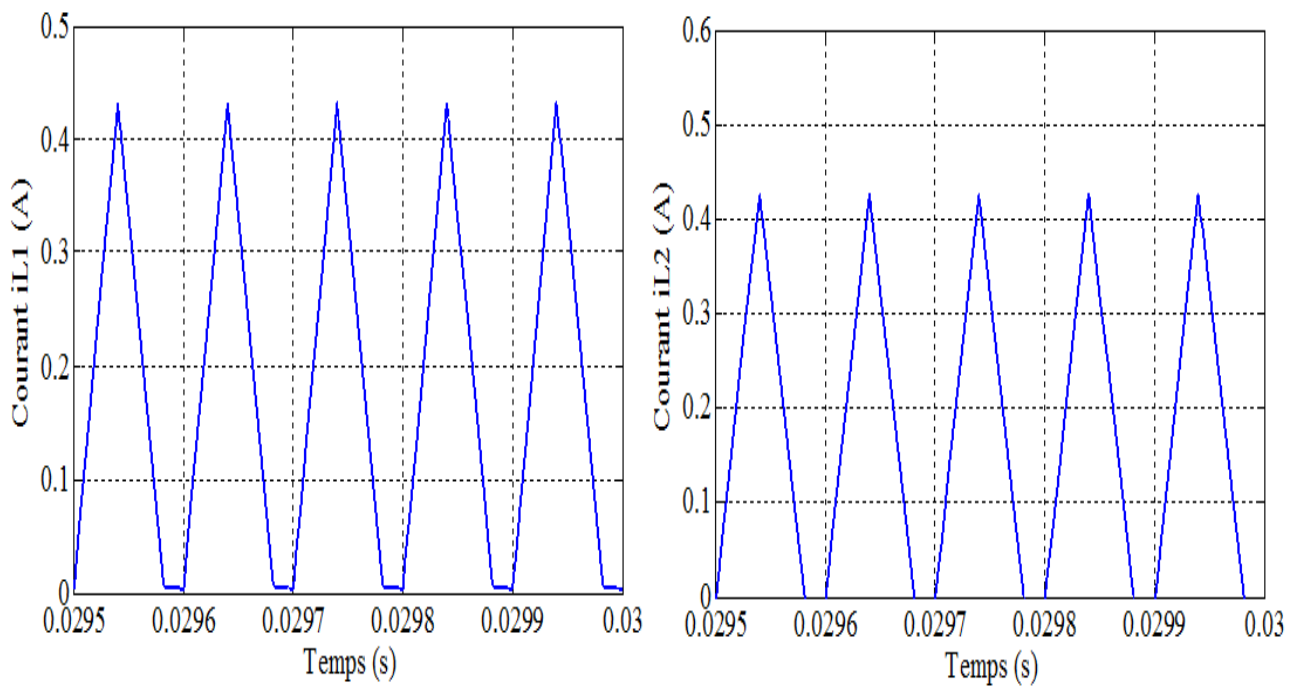


FIGURE 4.20 – Les allures des courants des inductances fonctionnement Buck.

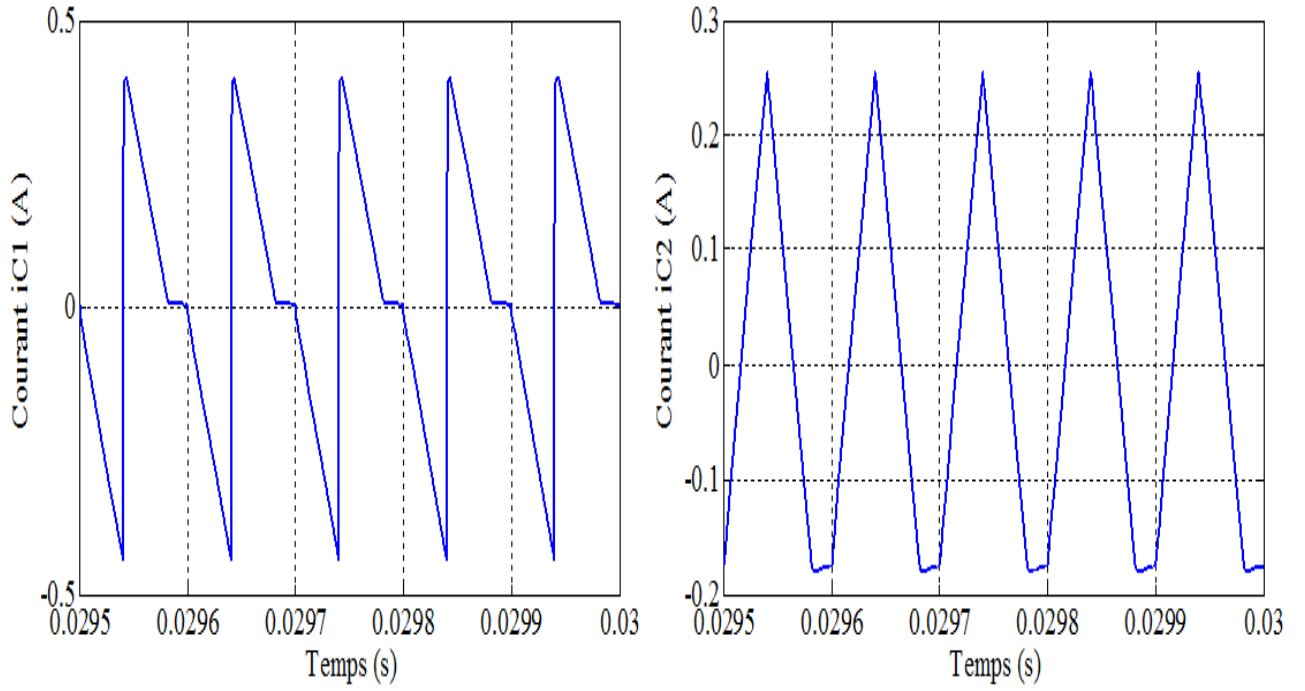


FIGURE 4.21 – Les allures des courants des capacités fonctionnement Buck.

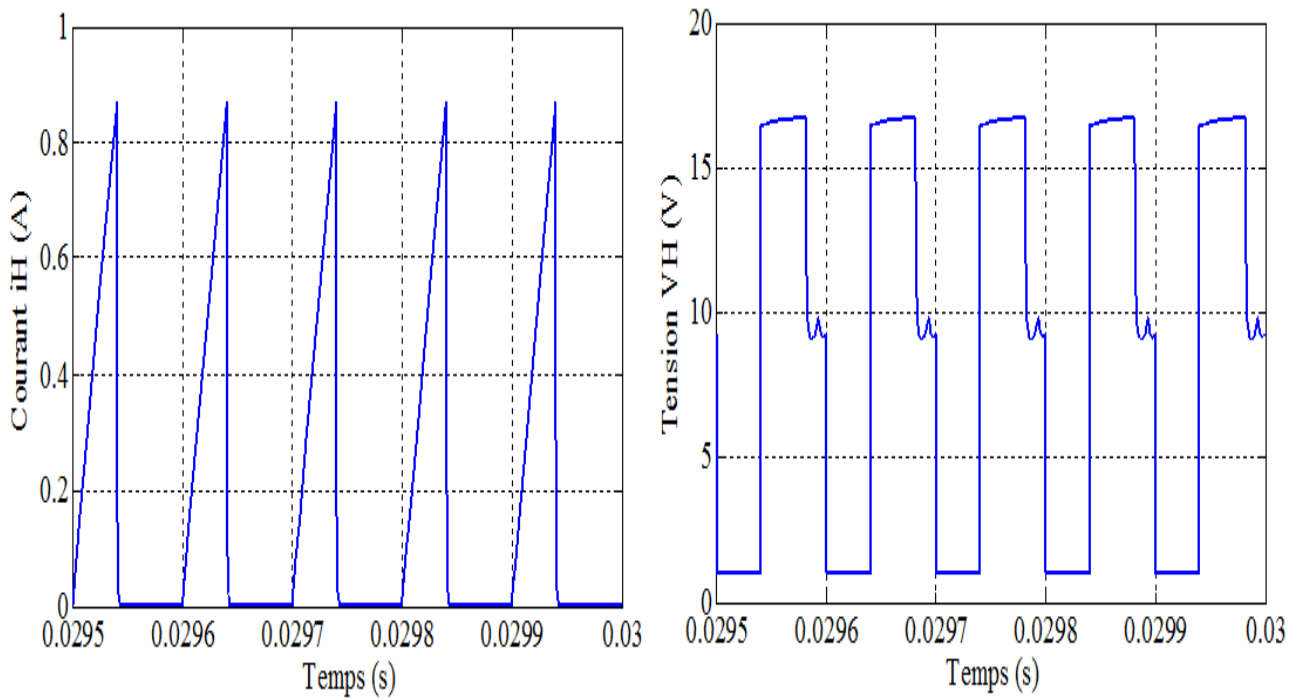


FIGURE 4.22 – Les allures de courant et de tension d'IGBT fonctionnement Buck.

Les résultats ci-dessus expliquent le fonctionnement de convertisseur Zeta en mode discontinue. C'est-à-dire les courants i_{L_1} et i_{L_2} traversant les inductances s'annulent. En conduction discontinue, la quantité d'énergie demandée par la charge est assez faible pour être transférée dans un temps plus court qu'une période de commutation. Dans ce cas, les courant traversant les inductances s'annulent pendant une partie de la période.

Les deux convertisseurs sont réalisés par les mêmes paramètres. On constate que, la simulation est similaire a la théorique ; ces derniers permettent bien, selon la valeur du rapport cyclique α , d'élever ou d'abaisser la tension de sortie V_{ch} . Si $\alpha \succ 0,5$ les deux convertisseurs fonctionnent en conduction continue et pour la même valeur du rapport cyclique $\alpha = 0,65$ le convertisseur Buck-Boost permet d'élever la tension de sortie V_{ch} plus que le convertisseur Zeta. par contre, si $\alpha \prec 0,5$ les deux convertisseurs fonctionnent en conduction discontinue et pour la même valeur du rapport cyclique $\alpha = 0,35$ le convertisseur Zeta permet d'abaisser la tension de sortie plus que le convertisseur Buck-Boost.

4.4 Techniques de la recherche du point de puissance maximale

La technique de la recherche du point de puissance maximale en anglais «Maximum Power Point Tracking» (MPPT), cette technique permet de contrôler le point de puissance maximale. Il existe de nombreux techniques utilisées pour trouver le point de puissance maximale. Idéalement, le suivi de la puissance se fait automatiquement pour s'adapter aux conditions météorologiques variables, ces algorithmes sont comme suites [25] :

- Technique a contre réaction de tension.
- Technique a contre réaction de courant.
- Technique a contre réaction de puissance.
- Technique Incrément de conductance.
- Technique Hill Climbing.

- Technique Perturb and Observe (P et O).

4.4.1 Algorithme perturbation et observation (P et O)

C'est l'algorithme de poursuite du point de puissance maximale (PPM) le plus utilisé, rapide et précise, c'est une méthode itérative permettant d'obtenir le point de puissance maximale; elle est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de la tension V_{pv} , ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur (DC-DC), puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie en vue d'une éventuelle correction de ce rapport cyclique α .

- Si la valeur de la puissance actuelle $P(k)$ du panneau est supérieure à la valeur précédente $P(k - 1)$, cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du le point de puissance maximale (s'approche), alors on garde la même direction de perturbation précédente.
- Si au contraire, la puissance $P(k)$ du panneau est inférieure à la valeur précédente $P(k - 1)$, cela implique que le système a déjà dépassé le point de puissance maximale, on inverse la perturbation du cycle précédent; voir la figure (4.23) [25].

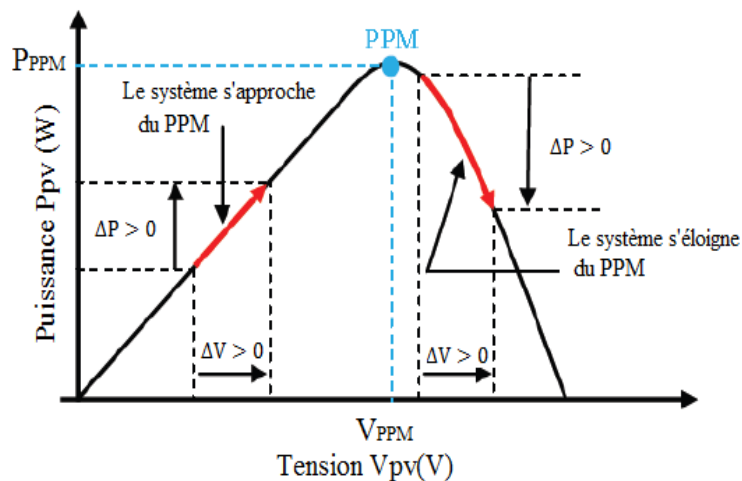


FIGURE 4.23 – La caractéristique (P-V) du panneau solaire, [25].

L'organigramme de l'algorithme de perturbation et de l'observation (P et O) est donné par la figure (4.24)

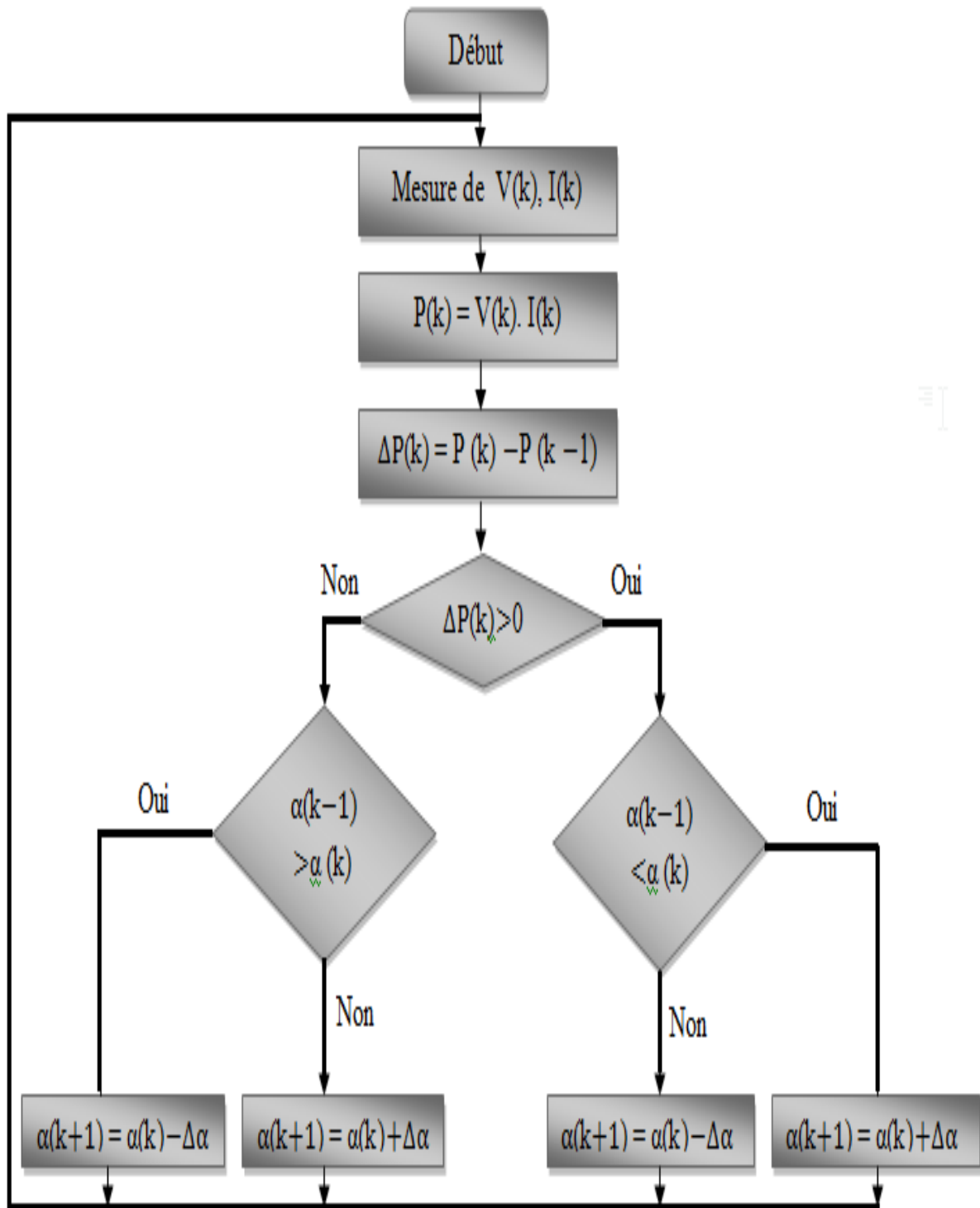


FIGURE 4.24 – Algorithme de perturbation et de l’observation (P et O).

4.4.2 Couplage direct (panneau-électrolyseur PEM)

Le couplage direct d’un système (panneau-électrolyseur PEM) est le système le plus simple et minimal, ou le panneau photovoltaïque est alimentée direc-

tement un électrolyseur PEM comme une charge susceptible de fonctionner à puissance variable, ce dernier modélisée par une résistance R . La source photovoltaïque et la charge ne sont plus adaptés par la figure (5.21) dans l'annexe C, ce qui implique un fonctionnement non optimal du panneau photovoltaïque.

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp^{q \left(\frac{V + I \times R_s}{n \times K \times T} \right)} - 1 \right] \quad (4.1)$$

$$V_{ch} = R \times i_{ch} = V_{pv} \quad (4.2)$$

$$i_{ch} = \frac{V_{ch}}{R} = I_{pv} \quad (4.3)$$

La solution des équations (4.1), (4.2) et (4.3) donne une point, cette point non optimale juste permet de connaisse que le convertisseur Buck-Boost fonctionne en Buck ou bien en Boost.

Pour un éclairement $E = 657 \text{W.m}^{-2}$, une température $T_c = 22.8^\circ\text{C}$ et le choix de trois charge différentes, les deux caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) du panneau solaire obtenus sont représentées dans les figures (4.25) et (4.26).

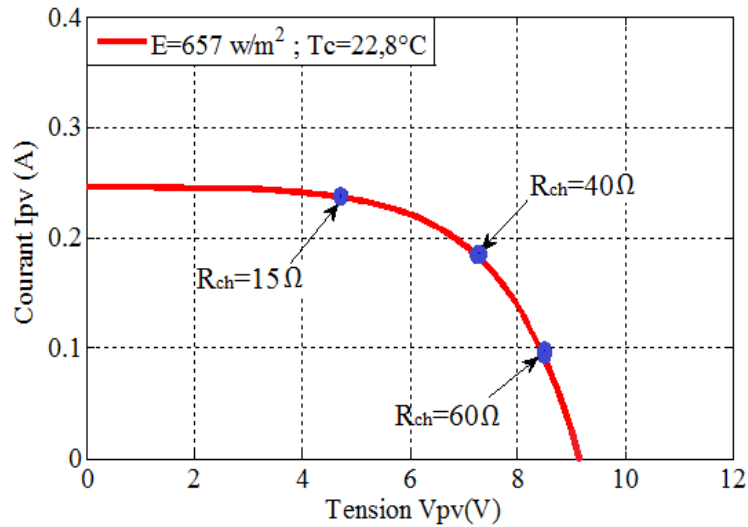


FIGURE 4.25 – La caractéristique (I-V) du panneau solaire.

Les points obtenus ne sont pas optimales, le point obtenu pour une charge $R_{ch} = 40\Omega$ est située dans la caractéristique du panneau solaire ou la tension V_{pv} est diminuée par contre le courant I_{pv} est augmenté. Dans ce cas, le convertisseur est un abaisseur de tension. Cette point est non optimale.

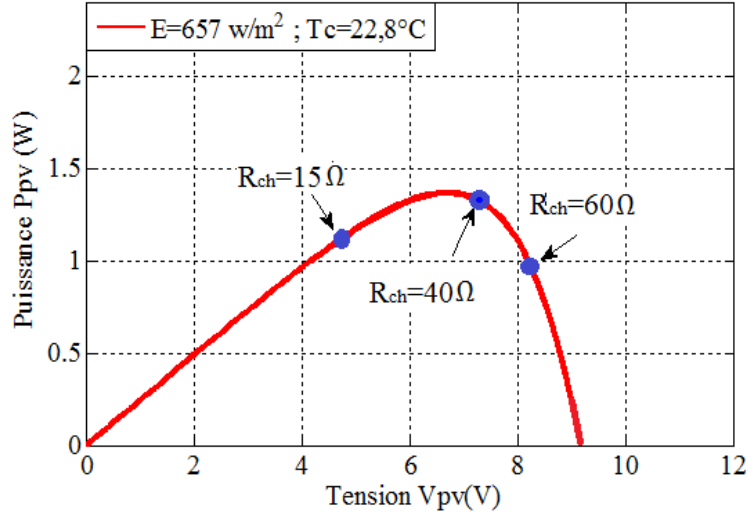


FIGURE 4.26 – La caractéristique (P-V) du panneau solaire.

On constate que, le convertisseur dépend de la charge (électrolyseur PEM). Par conséquent le courant I_{pv} est fort par contre la tension V_{pv} est faible; donc la P_{pv} puissance est faible.

4.4.3 Couplage d'un système complet sans optimisation

Le système complet (panneau PV-convertisseur DC-DC-électrolyseur PEM), ou le panneau photovoltaïque est alimentée un électrolyseur comme une charge, le convertisseur Buck-Boost fonctionne en Buck est un l'interface entre les deux précédents; le schéma bloc du système précédent est représenté par la figure (5.22) dans l'annexe C.

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp^{q \left(\frac{V + I \times R_s}{n \times K \times T} \right)} - 1 \right] \quad (4.4)$$

$$V_{ch} = R \times i_{ch} \quad (4.5)$$

$$V_{ch} = K \times V_{pv} \quad (4.6)$$

$$i_{ch} = \frac{I_{pv}}{K} \quad (4.7)$$

La solution des équations (4.4), (4.5), (4.6) et (4.7) donne une point, cette point non optimale.

Pour un éclairement $E = 657 \text{ W.m}^{-2}$ et une température $T_c = 22.8^\circ \text{C}$, les deux caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) du panneau

solaire obtenus sont représentées dans les figures (4.27) et (4.28).

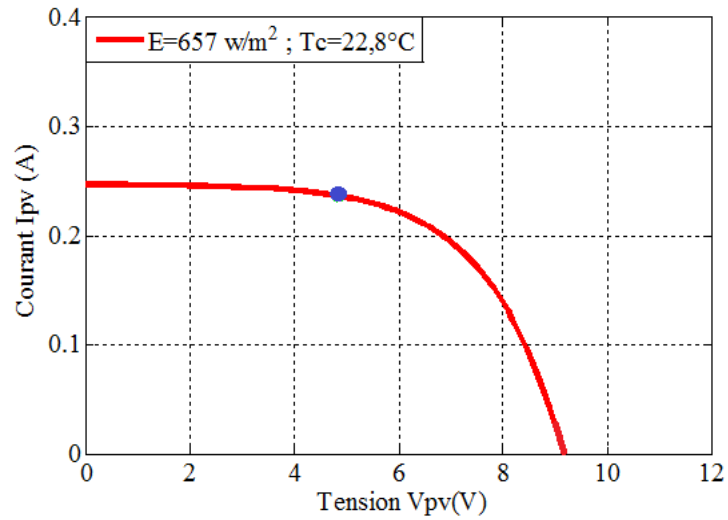


FIGURE 4.27 – La caractéristique (I-V) du panneau solaire.

Le point obtenu est située dans la caractéristique du panneau solaire ou la tension V_{pv} est augmentée par contre le courant I_{pv} est diminué. Cette point est non optimale.

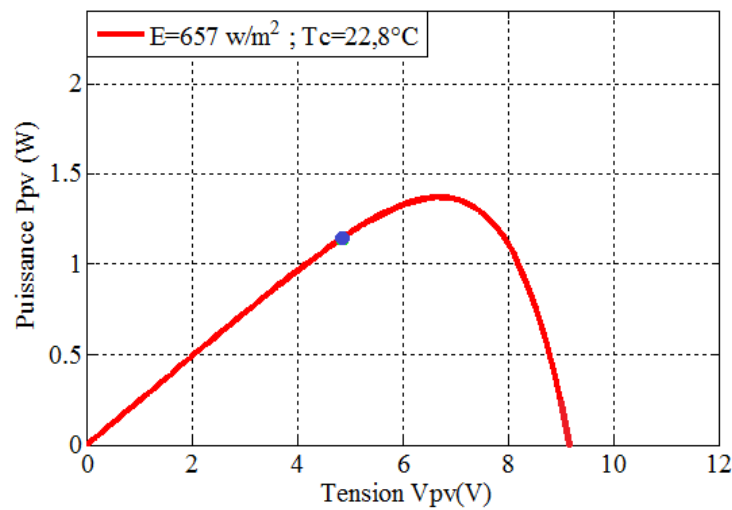


FIGURE 4.28 – La caractéristique (P-V) du panneau solaire.

On constate que, le courant I_{pv} est faible par contre la tension V_{pv} est forte ; donc la puissance P_{pv} est faible.

4.4.4 Couplage d'un système complet avec optimisation

Le système précédent ne obtenu pas le point de fonctionnement optimale, donc on a réaliser le schéma bloc d'un système précédent, puis applique la technique de la recherche du point de puissance maximale, cette technique permet de contrôler le point de puissance maximale. La technique choisit Perturbe et Observe (P et O), en agissant de façon automatique directement sur le rapport cyclique α du convertisseur.

Le schéma bloc d'algorithme Perturbe et Observe (P et O) représenté par la figure (5.23) dans l'annexe C.

Le schéma bloc d'un système électrolyseur PEM alimenté par une source PV, et assurer le couplage par un convertisseur DC-DC avec optimisation est représenté par la figure (5.24) dans l'annexe C.

Pour un éclairement $E = 657 \text{ W.m}^{-2}$ et une température $T_c = 22.8^\circ\text{C}$, les deux caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) du panneau solaire obtenus sont représentées dans les figures (4.29) et (4.30).

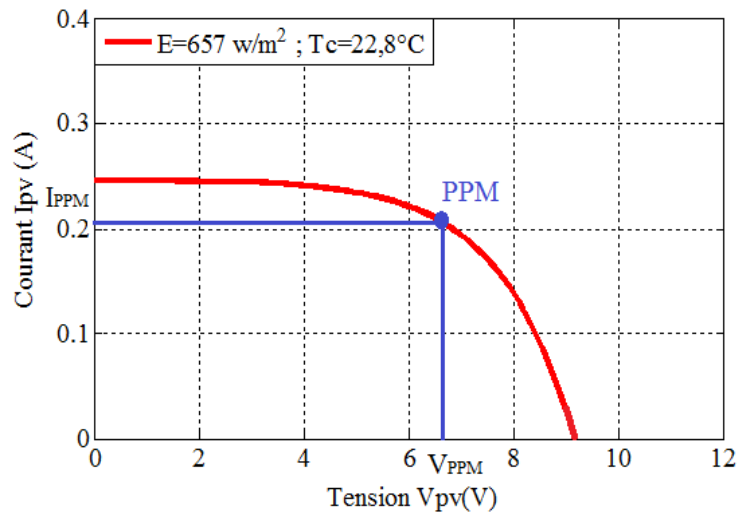


FIGURE 4.29 – La caractéristique (I-V) du panneau solaire.

Le point obtenu est située dans la caractéristique du panneau solaire ou la tension V_{pv} est augmentée et aussi le courant I_{pv} est augmenté. Cette point unique et optimale.

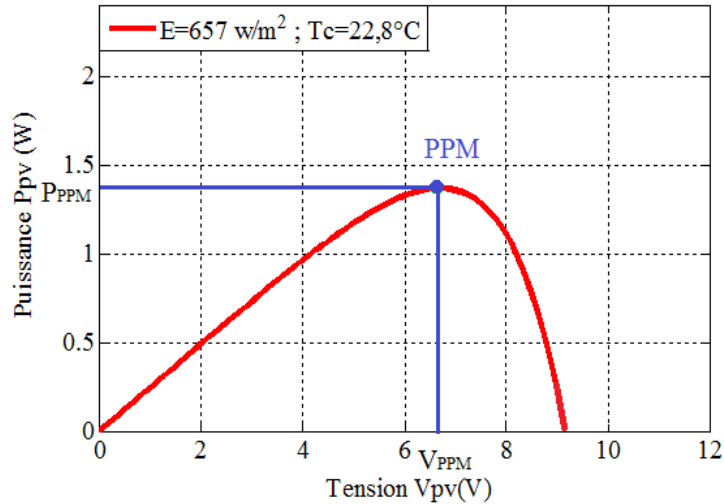


FIGURE 4.30 – La caractéristique (P-V) du panneau solaire.

On constate que, le courant I_{pv} est maximal et aussi la tension V_{pv} est maximale; donc la P_{pv} puissance est maximale. Donc le débit d'oxygène et d'hydrogène produits par l'électrolyseur est maximale aussi, et le rendement de fonctionnement de notre électrolyseur PEM est bien amélioré.

4.5 Conclusion

D'abord, dans ce chapitre nous avons utilisé le programme MATLAB/Simulink pour réaliser deux convertisseurs DC-DC, le premier non isolé Buck-Boost et le deuxième isolé Zeta. Puis lors des deux conceptions nous avons donné les résultats; et nous avons vu les points communs et les points différents entre ces convertisseurs. Ensuite, nous avons utilisé aussi le programme MATLAB/Simulink pour réaliser le système complet (panneau PV- convertisseur DC-DC-électrolyseur PEM). Après nous avons appliqué la technique MPPT pour obtenir le point de puissance maximale qui a été délivré par le panneau photovoltaïque, ainsi que nous avons bien présenté les résultats obtenus. Enfin nous avons connu que le débit d'oxygène et d'hydrogène produits par l'électrolyseur s'influe par le courant et la tension d'entrée d'électrolyseur, la température et par la qualité d'eau utilisée. Dans notre travail nous étions plus intéressés particulièrement sur l'influence de courant et de la tension. Pour

améliorer le rendement d'un électrolyseur PEM, en exploitation une source renouvelable gratuit inépuisable et propre tel que l'énergie solaire disponible en Algérie.

Chapitre 5

Validation expérimentale

5.1 Introduction

L'hydrogène est inodore, incolore, non polluant et non toxique ; ne se trouve dans la nature qu'à l'état combiné, surtout dans l'eau. L'utilisation nécessaire de l'hydrogène est comme combustibles, donc il est nécessaire de le produire, transportés, stockés puis utilisé. L'électrolyse de l'eau PEM est le procédé le plus répandu et le plus prisé pour la production de l'hydrogène. Le plus grand inconvénient de l'électrolyse de l'eau comme moyen de production de l'hydrogène est nécessité de l'énergie électrique pour produit de l'hydrogène. L'énergie électrique du réseau de distribution doit être transportée par des infrastructures coûteuses. Idéalement, l'énergie électrique utilisée pour la production d'hydrogène devrait provenir de sources renouvelables, tel que que l'énergie solaire photovoltaïque, éolienne ; pour produire un hydrogène pur d'une part, et économie d'hydrogène d'une autre part. La figure (5.1) résume le diagramme cycle d'hydrogène renouvelable au départ de la production jusqu'à l'utilisation.

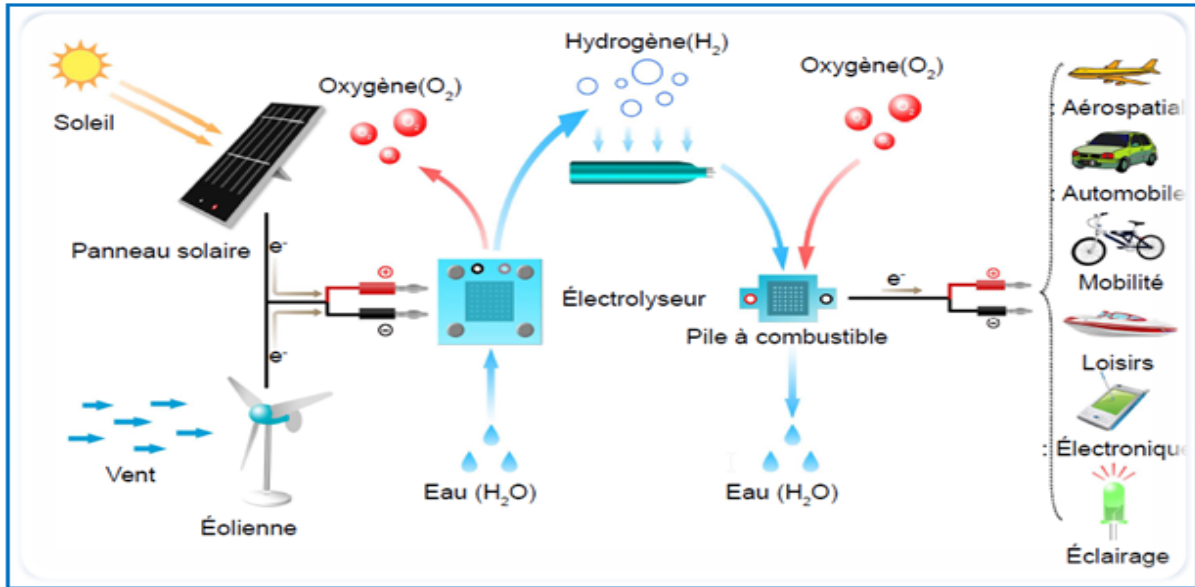


FIGURE 5.1 – Diagramme du cycle d'hydrogène renouvelable, [2].

5.2 Description de maquette

Les essais expérimentaux effectués dans le cadre de ce travail ont été réalisés sur une maquette pédagogique de la marque Horizon. La figure (5.2) montre tous les éléments qui constituent la maquette. Elle est constituée de trois vecteurs énergétiques qui sont l'énergie solaire photovoltaïque, l'énergie éolienne et l'hydrogène. Et d'autre accessoires ou composants électriques tels que la résistance variable de 100Ω (potentiomètre), un moteur à courant continue avec des petites hélices, un LED en anglais «Light Emitting Diodes» (charge fixe) sont utilisés comme charges et une batterie de 3V, contient aussi des fils de connexions et il y'a deux cylindres gradués qui contient deux cloche de verre pour stoker l'hydrogène et l'oxygène. Dans notre travail on s'intéresse plus particulièrement à l'électrolyseur. Ce travail est composée de 3 parties :

- La production d'hydrogène à partir de l'électrolyseur.
- Le stockage d'hydrogène.
- La production d'électricité à partir d'hydrogène produit par un électrolyseur.



FIGURE 5.2 – Maquette pédagogique Horizon.

5.2.1 L'électrolyseur PEM

L'électrolyseur est de type PEM (polymère électrolyte membrane), il est constitué d'une cellule élémentaire, son alimentation est assuré par un panneau solaire. Il peut fonctionné dans deux mode opposé ; donc il est réversible, il peut fonctionner comme une pile à combustible et peut fonctionner aussi comme un électrolyseur. Un électrolyseur est utilisé pour produit l'hydrogène et l'oxygène à partir d'eau distillée. Une pile à combustible est utilisé pour produit de l'électricité à partir d'hydrogène stocker. Il est représenté par la figure (5.3).

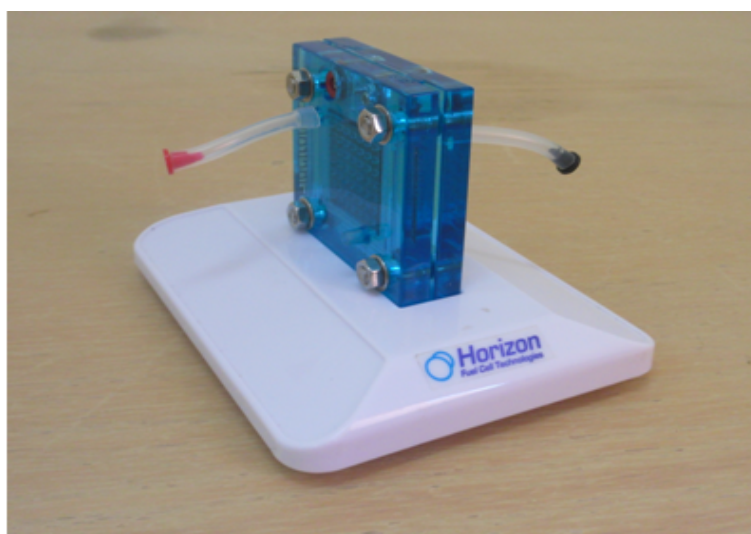


FIGURE 5.3 – L'électrolyseur de type PEM .

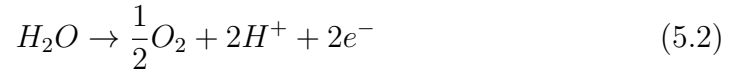
Le tableau (5.1) exprime les différentes caractéristiques de l'électrolyseur PEM.

Les réactions de ce électrolyseur sont écrites ci-dessous :

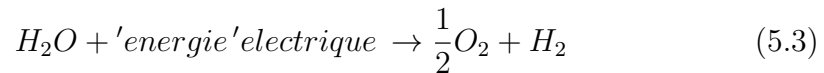
Anode :



Cathode :



Réaction globale :



L'équation(5.3) montre pourquoi la proportion d'hydrogène est double de celle d'oxygène durant l'électrolyse de l'eau.

TABLE 5.1 – Les caractéristiques de l'électrolyseur identifiés .

Caractéristiques	Valeurs
Dimensions	54x54x17mm
Le poids total	69,7g
Tension d'entrée	1,8V;3V(DC)
Courant d'entré	1A
Le taux de production H_2	16ml/min(1A)
Le taux de production O_2	8ml/min(1A)

5.2.2 Panneau solaire

L'électrolyseur PEM est nécessité à alimentée par une énergie électrique.

La production d'hydrogène devrait provenir de sources renouvelables (l'énergie solaire photovoltaïque) est assurée par des cellules photovoltaïques qui transforme l'énergie des photons arrivant à la surface de la terre en énergie électrique (électricité). Il est représenté par la figure (5.4). On a mesurer le courant et la tension pour différentes valeurs de l'éclairement et de température, puis on a



FIGURE 5.4 – Panneau solaire.

tracer les différentes caractéristiques.

Le tableau (5.2) exprime les différentes caractéristiques du panneau solaire identifiés.

TABLE 5.2 – Les caractéristiques du panneau solaire identifiés.

Caractéristique	Valeurs
La puissance optimale	3W
La tension du circuit ouvert	11,06V
Le courant de court-circuit	0,38A
La tension optimale	9V
Le courant optimale	0,34A
La résistance série	7 – 10 Ω
Le coefficient d'idéalité	1,36

Les deux figures (5.5) et (5.6) représentent les caractéristiques expérimentaux courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) du panneau solaire.

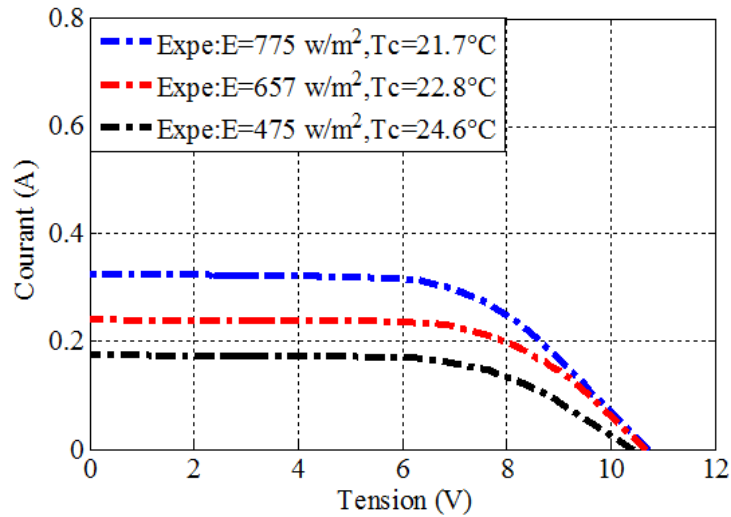


FIGURE 5.5 – La caractéristique (I-V) expérimentale du panneau solaire.

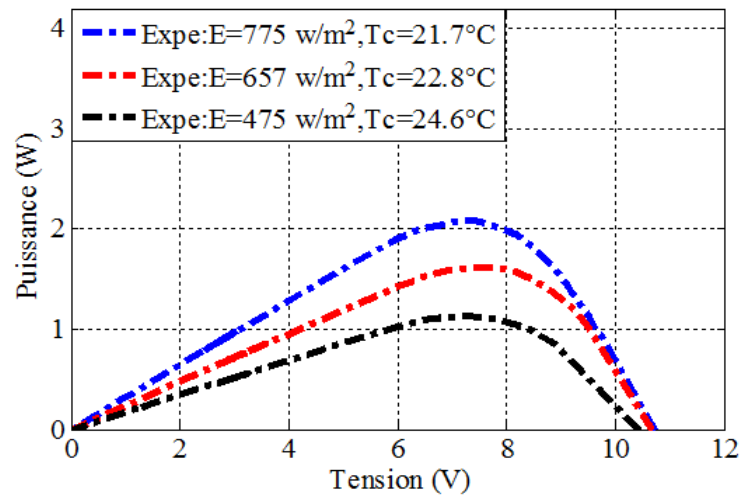


FIGURE 5.6 – La caractéristique (P-V) expérimentale du panneau solaire.

5.2.2.1 Modèle équivalent d'une cellule PV à une diode

La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit électrique de la figure (5.7), qui se compose d'une diode mise en parallèle avec une source de courant modélisant le flux lumineuse et les pertes sont modélisées par deux résistances, une résistance série, une résistance shunt.

En notant :

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (5.4)$$

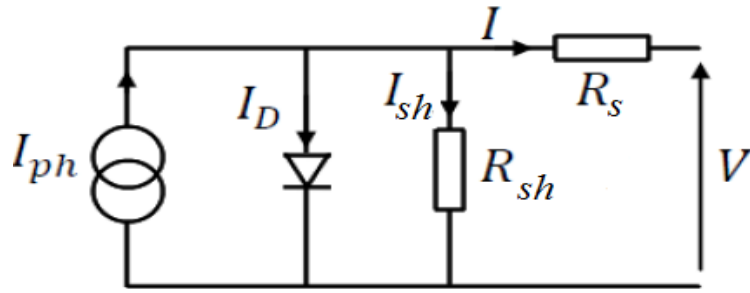


FIGURE 5.7 – Modèle équivalent d'une cellule PV à une diode.

Où :

$$I_D = I_0 \left[\exp^{q \left(\frac{V + I \times R_s}{n \times K \times T} \right)} - 1 \right] \quad (5.5)$$

Lorsque R_{sh} est plus grande :

$$I_{sh} = \left(\frac{V + I \times R_s}{R_{sh}} \right) = 0 \quad (5.6)$$

Donc :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp^{q \left(\frac{V + I \times R_s}{n \times K \times T} \right)} - 1 \right] \quad (5.7)$$

Avec :

I : Le courant d'une cellule.

I_{ph} : Le photocourant, ou courant généré par l'éclairement (A).

I_D : Courant de diode.

I_{sh} : Le courant dérivé par la résistance parallèle.

I_0 : Le courant de la saturation de la diode, dépendant de la température.

q : La charge d'un électron ($1.6 \cdot 10^{-19} \text{C}$).

V : La tension aux bornes d'une cellule.

R_s : Résistance en série.

R_{sh} : Résistance en parallèle.

n : Facteur d'idéalité de la diode.

K : La constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23} \text{Joules/Kelvin}$).

T : La température du cellule en ($^{\circ}\text{K}$).

Les deux figures (5.8) et (5.9) représentent les caractéristiques expérimentaux et simulations courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) du panneau solaire.

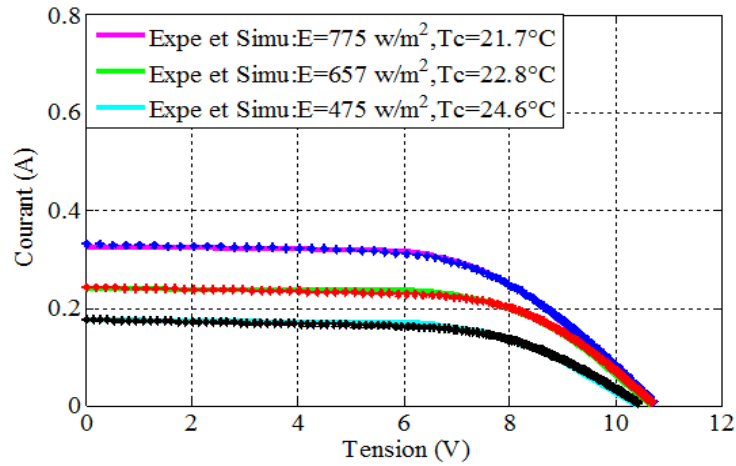


FIGURE 5.8 – Les caractéristiques (I-V) expérimentaux et simulations du panneau.

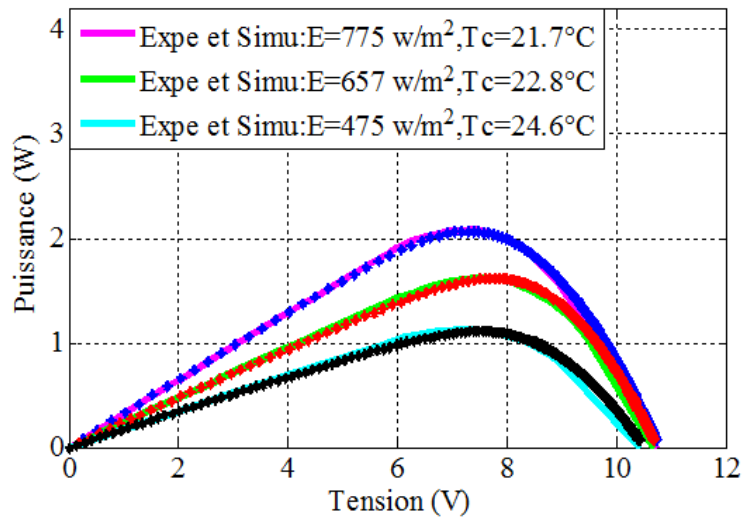


FIGURE 5.9 – Les caractéristiques (P-V) expérimentaux et simulations du panneau.

5.2.2.2 L'influence de la température et de l'éclairement

Les caractéristiques d'une cellule PV est directement dépendante de l'éclairement et de la température.

1. L'influence de l'éclairement :

Les variations du courant et de la puissance en fonction de la tension pour différents niveaux d'éclairement à température constante, montrent que le courant de court-circuit I_{cc} varie proportionnellement à l'éclairement, mais la tension de circuit ouvert V_{co} varie très peu. Plus l'éclairement est élevé plus I_{cc} élevé et V_{co} faible ou inverse ; alors la puissance maximale

est faible. Les deux figures (5.10) et (5.11) expliquent bien tous que l'on dit précédent.

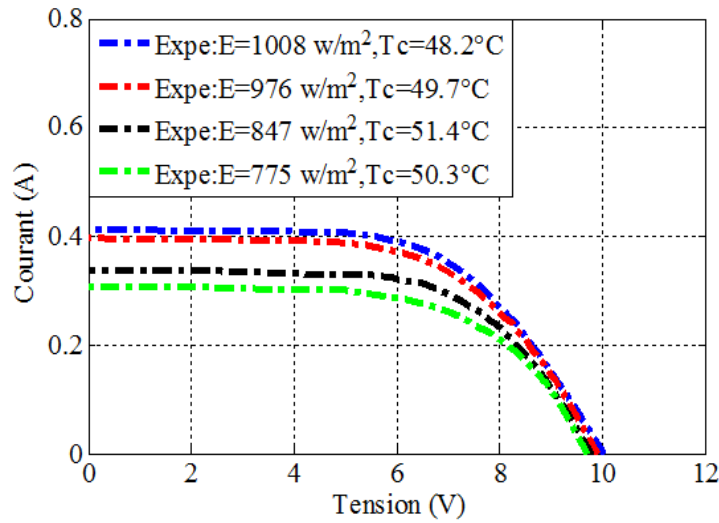


FIGURE 5.10 – L'effet de l'éclairement sur la caractéristique (I-V) du panneau.

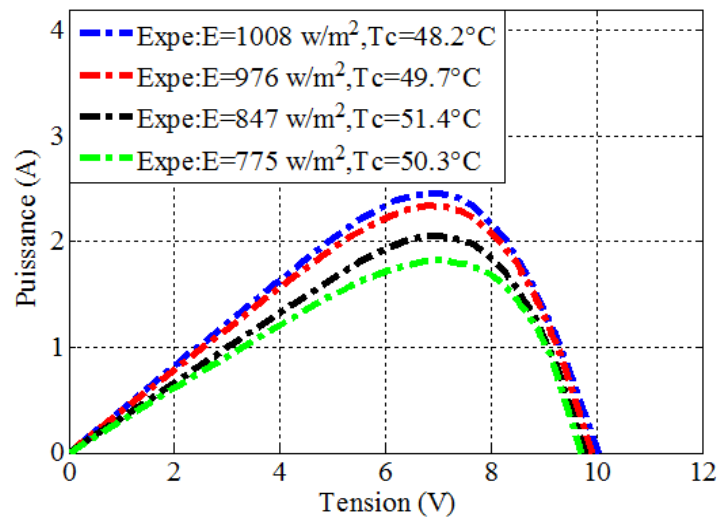


FIGURE 5.11 – L'effet de l'éclairement sur la caractéristique (P-V) du panneau.

2. L'influence de la température :

Les variations du courant et de la puissance en fonction de la tension pour différents niveaux de température à éclairement constante, montrent que si la température croît V_{co} décroît ; plus la température est élevée plus V_{co} est faible et I_{cc} augment avec la température, dans la majorité de cas peut être négligée ; alors la puissance maximale est faible.

Les deux figures (5.12) et (5.13) expliquent bien tous que l'on dit précédent.

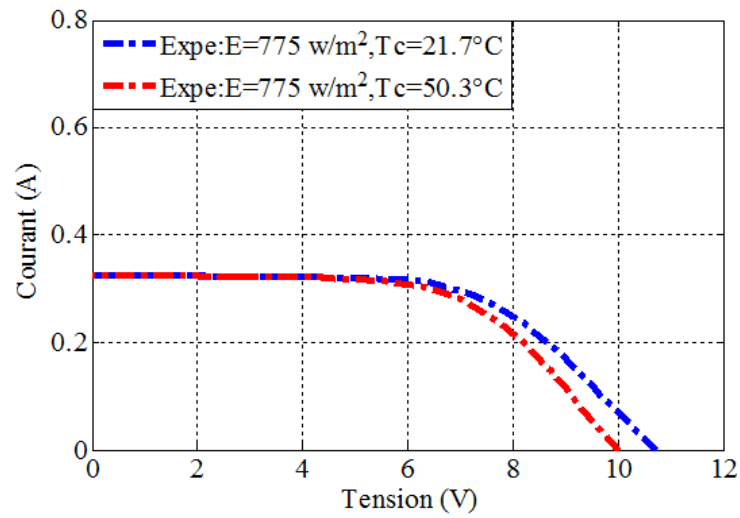


FIGURE 5.12 – L'effet de la température sur la caractéristique (I-V) du panneau.

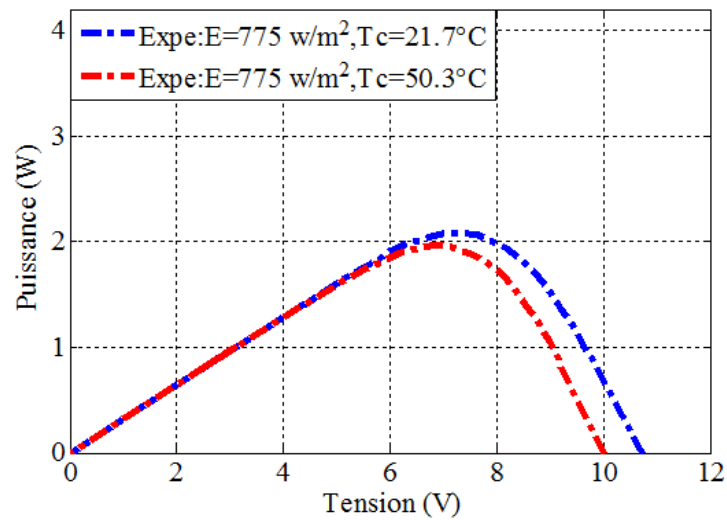


FIGURE 5.13 – L'effet de la température sur la caractéristique (P-V) du panneau.

Ainsi que, la figure (5.14) montre que le courant de court-circuit I_{cc} varie proportionnellement à l'éclairement, et la figure (5.14) montre que la tension de circuit-ouvert V_{cc} ne varie pas proportionnellement à l'éclairement.

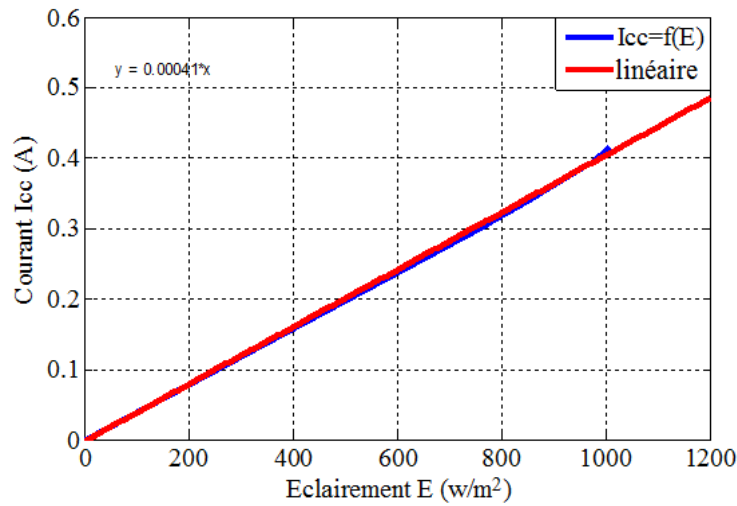


FIGURE 5.14 – Variation du courant de court-circuit I_{cc} en fonction de l'éclairement.

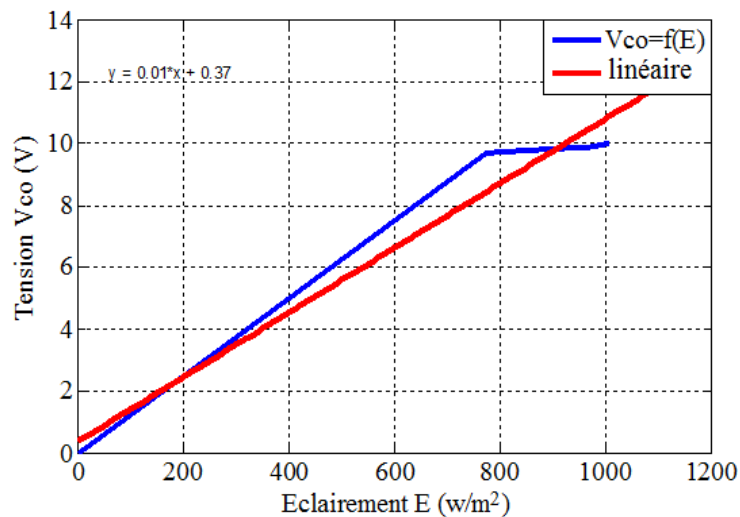


FIGURE 5.15 – Variation du tension de circuit-ouvert V_{co} en fonction de l'éclairement.

Donc, l'éclairement et la température sont les deux principaux paramètres qui modifient les caractéristiques du panneau solaire; les meilleures conditions pour les deux paramètres sont 25°C et 1000w.m^{-2} .

5.2.3 Production d'hydrogène à partir de l'électrolyse de l'eau

L'électrolyseur est connecté par un panneau solaire qui permet de composer l'eau distillée en deux gaz oxygène et hydrogène stockés dans deux cylindres

graduées, comme montre dans la figure (5.16). D'abord on a mesurer le courant, la tension électriques et le volume d'hydrogène et d'oxygène produits, ensuite on a calculer la quantité d'électrons échangée dans l'électrolyseur.

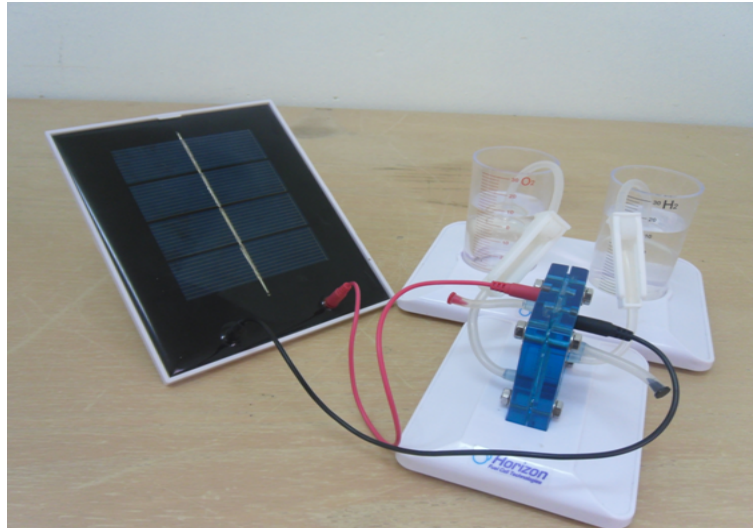


FIGURE 5.16 – L'électrolyse de l'eau à partir de l'énergie solaire.

Comme on a dit précédent dans l'équation (5.3) la proportion d'hydrogène est double de celle d'oxygène durant l'électrolyse de l'eau et vérifie aussi par les volumes d'hydrogène et d'oxygène produits.

Le nombre d'électrons échangée dans l'équation (5.3) est : $2e^-$.

La charge électrique correspondante :

Si l'intensité du courant qui traversé l'électrolyseur est notée I et ne varie pas pendant la durée Δt , on a alors :

$$Q = I \times \Delta t = 0,47 \times 317 = 148,99C \quad (5.8)$$

Avec :

I : Intensité du courant en A.

Δt : Durée en s.

Q : Quantité d'électrons en C.

Le tableau (5.2) exprime les dimensionnements de l'électrolyseur.

TABLE 5.3 – Les caractéristiques de l'électrolyseur.

Paramètres	Valeurs
Durée	5min17s
Courant	0,47A
Tension	1,49V
Puissance	0,7W
Énergie	0,06wattheur
Volume de H_2 produit	16ml
Volume de O_2 produit	8ml

5.2.4 Production d'électricité à partir d'hydrogène

Comme on a parlé précédemment que l'électrolyseur est permis de fonctionner comme électrolyseur pour produire l'oxygène et l'hydrogène puis stocker dans deux réservoirs. Après ce dernier fonctionner comme pile, elle est utilisée pour produire de l'électricité à partir de l'oxygène et l'hydrogène stockés et alimenter soit une charge variable, soit un petit moteur à courant continu ou bien une charge fixe (LED) ; voir la figure (5.17).

On a mesuré le courant et la tension pour calculer la quantité d'électrons échangée dans un électrolyseur alimentant une charge fixe (pile), puis tracer la caractéristique tension-courant (V-I) d'un électrolyseur alimentant une charge fixe LED (pile).

L'électrolyseur alimentant une charge fixe (LED) délivre un courant $I = 0,06A$ pendant $t = 317min$.

$$Q = I \times \Delta t = 0,06 \times 317 = 19,02C \quad (5.9)$$

On constate, que pour la même durée du temps la quantité d'électrons échangée dans un électrolyseur alimentant une charge fixe (pile) est supérieure à la quantité d'électrons échangée dans un électrolyseur alimentant une charge fixe (pile).

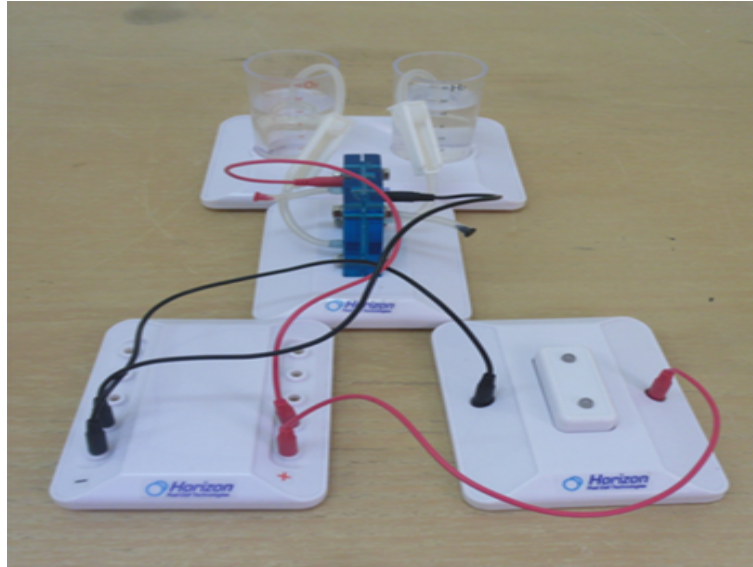


FIGURE 5.17 – L'électrolyseur alimente une charge fixe (LED).

La figure (5.18) représente la caractéristique (V-I) d'électrolyseur alimente une charge fixe (LED).

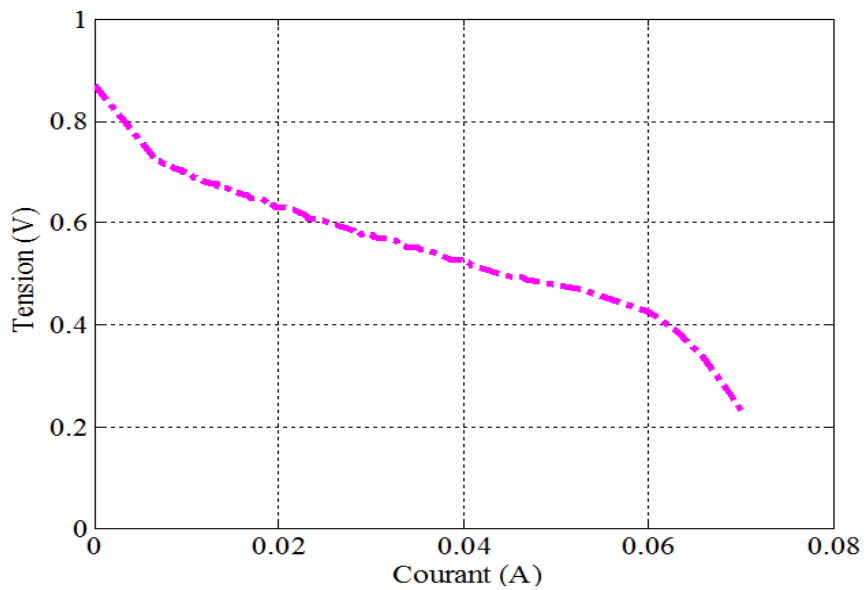


FIGURE 5.18 – La caractéristique (V-I) d'électrolyseur alimente une charge fixe (fonctionnement pile).

La figure ci-dessus montre la réversibilité d'électrolyseur PEM.

5.3 Conclusion

D'abord, dans ce chapitre nous avons donné une description détaillé sur la maquette pédagogique de la marque Horizon. Ensuite, nous nous effectuons des essais expérimentaux. Enfin, nous avons bien présenté les résultats obtenus.

Conclusion générale

Bilan et contributions

L'hydrogène est le combustible et le porteur potentiel d'énergie de la futur. L'électrolyse de l'eau PEM est le procédé le plus répandu et le plus prisé pour la production d'hydrogène.

Le travail présenté dans ce mémoire focus sur l'optimisation du fonctionnement d'un électrolyseur à travers un convertisseur DC-DC.

D'abord, cette étude permet de présentée :

- Une étude détaillée sur l'électrolyseur, présente les différents types d'électrolyseur, puis les constituées et le principe de fonctionnement d'électrolyseur PEM. Après tous les majeures techniques utilisées pour la production d'hydrogène, stockage et la sécurité.
- Une présentation générale sur l'énergie photovoltaïque.

Et aussi, étude théorique de fonctionnement de deux convertisseurs DC-DC Buck-Boost et Zeta, le premier non isolé et le deuxième isolé.

Ensuite, simulation de deux convertisseurs précédents à l'aide de programme MATLAB/Simulink. Les résultats obtenus démontrés le principe de fonctionnement théorique. Les allures relevées sont identiques.

- L'électrolyseur PEM nécessite un fort courant pour produire un grand débit d'hydrogène, d'où son couplage direct avec un panneau PV fait fonctionner le système sous un rendement médiocre. Alors, l'application de la technique MPPT est exploitée pour obtenir le point de puissance maximale et aussi d'améliorer le rendement d'un électrolyseur PEM. L'algorithme P et O proposé nous a donné des résultats précise et rapide. Il ce converge dans un peu

de temps.

Enfin, ce travail a été enrichi par une validation expérimentale de différentes parties existantes dans une maquette. Les essais effectués nous ont permis d'identifier et caractériser le panneau PV et de l'électrolyseur PEM, les caractéristiques expérimentales sont proches des résultats de simulation.

Perspectives de recherche

Certains développements de ce travail peuvent être envisagés pour un futur proche dont nous citons :

1. Applications d'une autre technique d'MPPT et fait la comparaison entre eux.
2. Proposition d'un modèle d'électrolyseur réel en tenant en compte les paramètres influant sur le débit et la pression de stockage.
3. Avec la disponibilité des composants en assure :
 - La réalisation pratique d'un électrolyseur PEM alimenté par une source PV et assurer le couplage par un convertisseur DC-DC.
 - La réalisation de la technique MPPT perturbé et observe (P et O) en boucle ouverte et fermée par l'Arduino.

Annexe A

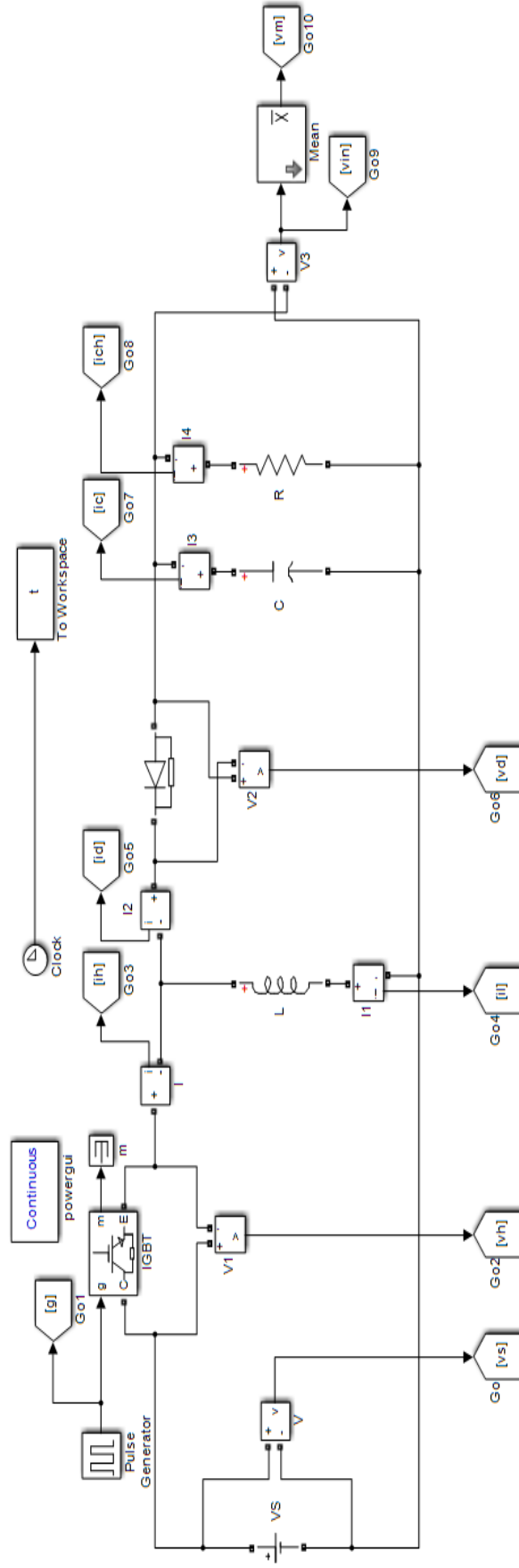


FIGURE 5.19 – Schéma bloc d'un convertisseur Buck-Boost.

Annexe C

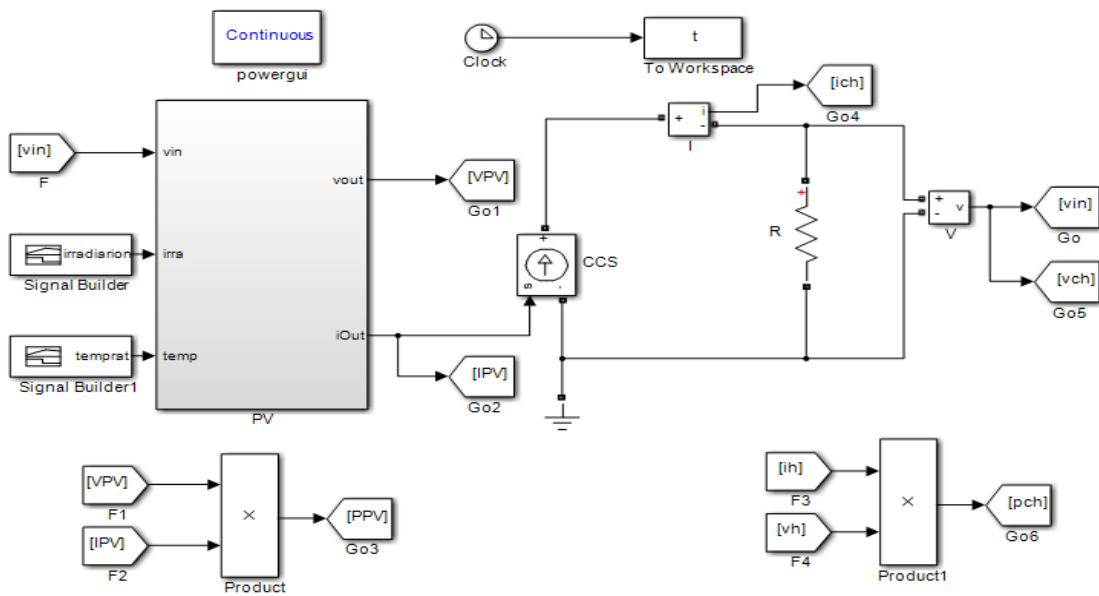


FIGURE 5.21 – Schéma bloc d'un couplage direct (panneau PV- électrolyseur PEM).

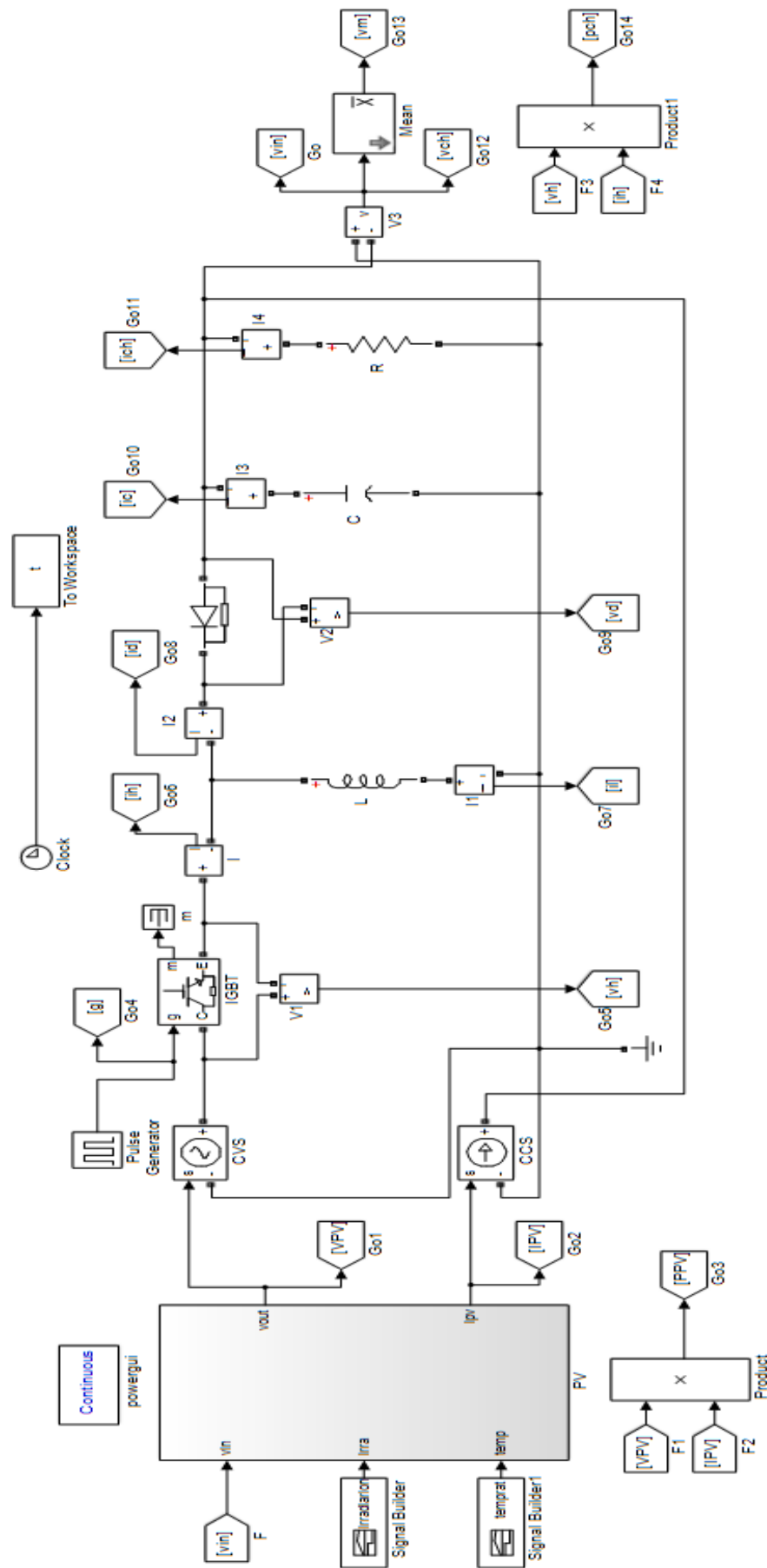


FIGURE 5.22 – Schéma bloc d'un couplage indirect(panneau PV-convertisseur DC-DC-électrolyseur PEM) sans optimisation.

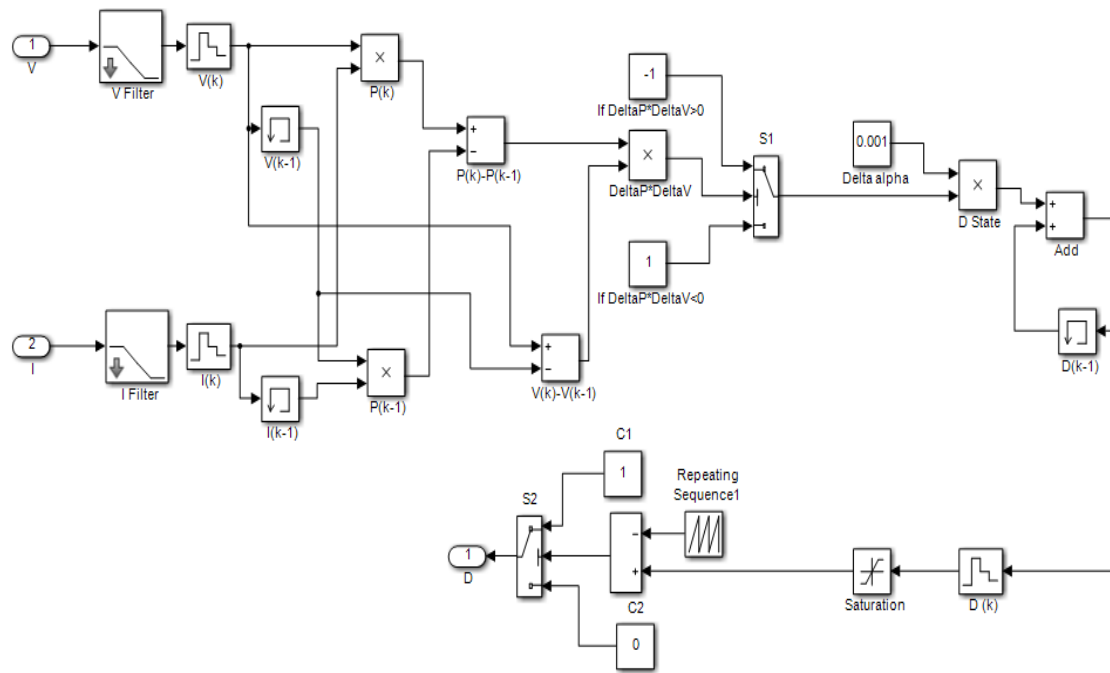


FIGURE 5.23 – Le schéma bloc d’algorithme Perturbe et Observe (P et O).

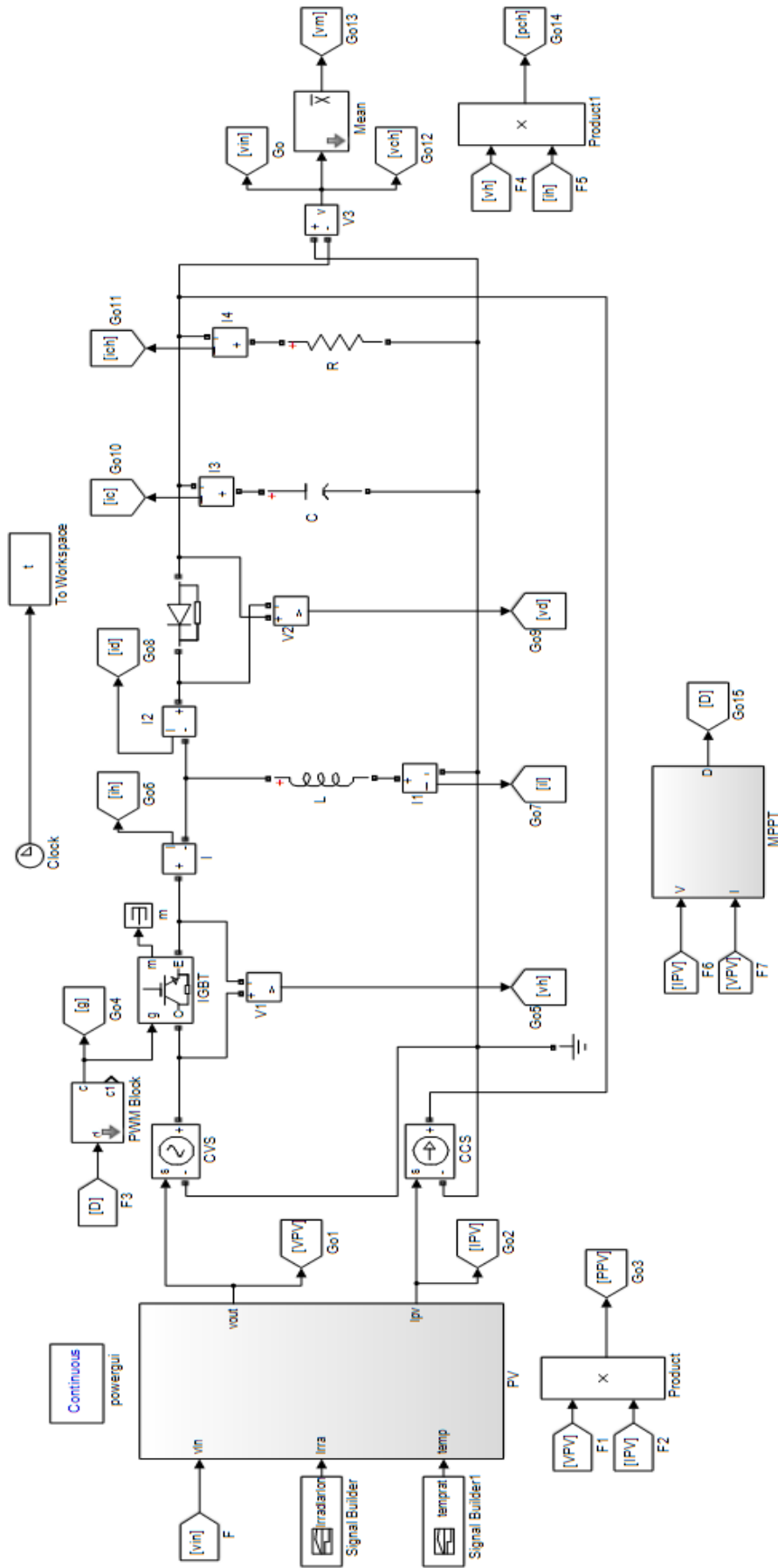


FIGURE 5.24 – Schéma bloc d'un couplage indirect (panneau PV-convertisseur DC-DC-électrolyseur PEM) avec optimisation.

Bibliographie

- [1] J Labbé. "L'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isole". Thèse de doctorat, École des Mines de Paris-France, 21 Décembre 2006.
- [2] N Mamaca. "Synthèse et Caractérisation de matériaux électro catalytiques pour l'activation de la molécule d'eau : Application dans une Anode d'électrolyseur de type PEM". Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 4 Novembre 2011.
- [3] S Rabih. "Contribution à la modélisation de systèmes réversibles de types électrolyseur et pile à hydrogène en vue de leur couplage aux générateurs photovoltaïques". Thèse de doctorat, Université de Toulouse-France, 03 Octobre 2008.
- [4] O Rallieres. "Modélisation et caractérisation de pile à combustible et électrolyseur PEM". Thèse de doctorat, Université de Toulouse-France, 14 Novembre 2011.
- [5] C Rozain. "Développement de nouveaux matériaux d'électrodes pour la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau". Thèse de doctorat, Université de Paris Sud XI-France, 27 Septembre 2013.
- [6] M Salhi. "Étude de la production d'hydrogène par l'électrolyse et pile à combustible". Thèse de magister, Université Mentouri de Constantine-Algérie, 17 Octobre 2010.
- [7] K Bouziane. "Étude d'une installation photovoltaïque de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau". Thèse de magister, Université Kasdi Merbah Ouargla-Algérie, 12 Mai 2011.

- [8] K.S Agbli. "Modélisation multiphysique des flux énergétiques d'un couplage photovoltaïque-électrolyseur PEM-pile à combustible PEM en vue d'une application stationnaire". Thèse de doctorat, Université de Cocody-Abidjan, 6 Mars 2012.
- [9] S Ameziane. "Implantation expérimentale de l'MPPT pour un système de génération hybride solaire-éolien". Thèse de magister, Université Elhadj Lakhder de Batna-Algérie, 1 Juin 2009.
- [10] A.C Pastor. "Conception et réalisation de module photovoltaïque électronique". Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse-France, 29 Septembre 2006.
- [11] S Zeggaoui. "Optimisation d'un générateur photovoltaïque avec une commande MPPT numérique". Thèse de magister, École National Polytechnique Elharrach d'Alger-Algérie, 2013.
- [12] K Helali. "Modélisation d'une cellule photovoltaïque : étude comparative". Thèse de magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou-Algérie, 25 Juin 2012.
- [13] S Vighetti. "Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : choix et dimensionnement des étages de conversion". Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 24 Septembre 2010.
- [14] L Abbassen. "Étude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque". Thèse de magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou-Algérie, 5 Mai 2007.
- [15] F Kendouli. "État de l'art et modélisation des microcentrales". Thèse de magister, Université Mentouri de Constantine-Algérie, 2007.
- [16] F Bouchafaa. "support cours électronique de puissance M.L.E.502 et L.G.E.604". Cours, Université Houari Boumediene d'Alger-Algérie, 2008-2009.
- [17] M Bensoam. "Capteurs et actionneurs". Cours, Université de Paul Cézanne AIX Marseille III-France, 21 janvier 2005.

- [18] S Bernardini. "Modélisation des structures Métal-Oxyde semi-conducteur (MOS) : applications aux dispositifs mémoires". Thèse de doctorat, Université d'AIX-Marseille I-France, 8 Octobre 2004.
- [19] N Abouchabana. "Étude d'une nouvelle topologie Buck-Boost appliquée à un MPPT". Thèse de magister, École National Supérieure Polytechnique-Algérie, 2008-2009.
- [20] S Djeriou. "Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone". Thèse de magister, Université Ferhat Abbas de Sétif-Algérie, 3 Juillet 2011.
- [21] I.D Kim, S.H Paeng, J.W Ahn, E.C Nho and J.S Ko. "New bidirectional ZVS PWM Sepic/Zeta DC-DC converter". IEEE, 1-4244-0755-9/07, 2007.
- [22] B Huang. "Convertisseur continu-continu a rapport de transformation élevé pour application pile à combustible". Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine-France, 14 Mai 2009.
- [23] H Qiaor, Y Zhang, Y Yao and L Wei. "Analysis of buck-boost converters for fuel cell electric vehicles". IEEE, 1-4244-0759-1/06, 2006.
- [24] E Vuthchhayt, C Bunlaksananusorn and H Hirata. "Dynamic modeling and control of a Zeta converter". IEEE, 978-1-4244-2336-1/08, 2008.
- [25] A.T Singo. "Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome". Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré de Nancy-France, 3 Février 2010.