

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira -
Tasdawit Akli Muḥend Ulḥağ - Tubirett -



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة أكلي محمد أولحاج
- البويرة -

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

كلية العلوم والعلوم التطبيقية

Référence :/MM/2021

المرجع :/م/م / 2021

Mémoire de Master

Présenté au

Département : Génie Électrique

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electronique

Spécialité : Electronique des systèmes embarqués

Réalisé par :

BENABDERRAHAMANE NABILA

Et

HATHAT LYDIA

Thème

*Conception d'un système de protection cathodique par courant
imposé alimenté par des panneaux photovoltaïques*

Soutenu le : 03/06/2023

Devant le Jury composé de :

Mr :	HAROUN SMAIL	M.C.A	Univ. Bouira	Président
	FEKIK AREZKI	M.C.A	Univ. Bouira	Promoteur
	ABBASSEN ILYES	Chercheur	DC R&D	Co-Promoteur
	AGGOUN GHANIA	M.C.A	Univ. Bouira	Examineur



نموذج التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنجاز بحث.

انا الممضي اسفله،

السيد(ة) HATHAT Lydia الصفة: طالب(ة)

الحامل(ة) لبطاقة التعريف الوطنية: 100734529 والصادرة بتاريخ 28.04.2016

المسجل(ة) بكلية: العلوم والعلوم التطبيقية. قسم: الهندسة الكهربائية ESE

والمكلف(ة) بإنجاز اعمال بحث مذكرة ماستر.

عنوانها: Conception d'un système de protection cathodique alimenté par des
panneaux photovoltaïque

تحت إشراف الأستاذ(ة): AREZKI FEKIK

أصرح بشرفي أنني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة الاكاديمية المطلوبة
في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 26.06.2023

توقيع المعني(ة)

رأي هيئة مراقبة السرقة العلمية:

Turnitin

%

7

النسبة:

الامضاء:



نموذج التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنجاز بحث.

انا الممضي اسفله،

السيدة(ة) BENABDERRAHMANE Nabila الصفة: طالب(ة)

الحامل(ة) لبطاقة التعريف الوطنية: 404991145 والصادرة بتاريخ 04.03.2023

المسجل(ة) بكلية: العلوم والعلوم التطبيقية. قسم: الهندسة الكهربائية ESE

والمكلف(ة) بإنجاز اعمال بحث مذكرة ماستر.

عنوانها: Conception d'un système de protection cathodique alimenté par des
panneaux photovoltaïque

تحت إشراف الأستاذ(ة): AREZKI FEKIK

أصرح بشرفي أنني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة الاكاديمية المطلوبة
في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 26.06.2023

توقيع المعني(ة)

رأي هيئة مراقبة السرقة العلمية:

Turnitin

%

7

النسبة:

الامضاء:

Remerciement

Arrivé au terme de notre mémoire, nous remercions notre grand Dieu tout puissant, lui exprimant notre reconnaissance pour sa grande générosité. Dieu nous a garanti la foi, la volonté, la patience, la santé et la confiance durant toutes nos années d'études.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers nos familles, nos parents, nos frères et nos sœurs, dont le soutien inconditionnel a été d'une valeur inestimable tout au long de notre parcours académique. Leur amour, leurs encouragements et leur confiance ont été une source d'inspiration constante pour nous.

Nous souhaitons également exprimer notre sincère reconnaissance envers notre promoteur, Monsieur **FEKIK Arezki** et Co-promoteur **ABBASSEN Ilyes** chercheur en électricité et instrumentation à **SONATRACH (Direction centrale recherche et développement)**, dont l'expertise, les conseils avisés et le dévouement à notre projet de recherche ont été d'une importance capitale. Leur accompagnement éclairé et leur patience nous ont permis d'évoluer en tant que chercheuses.

Nous tenons à adresser nos remerciements aux personnels de **la Direction centrale recherche et développement DC R&D**, qui nous a gracieusement accueillis lors de notre stage. Leur hospitalité généreuse, leur disponibilité et leur partage d'expérience ont grandement enrichi notre apprentissage pratique. Nous tenons à remercier aussi Monsieur **Samih HADDANA** pour son accompagnement lors de notre stage en dépit de ses autres engagements et occupations ainsi que Monsieur **IHADEN** pour ses conseils précieux et son savoir-faire professionnel et personnel.

Nous désirons transmettre également nos remerciements, et notre gratitude envers l'ensemble des équipes du laboratoire **LATAGE** d'électrotechnique de l'université UMMTO. Les installations de pointe et l'environnement de recherche stimulant qu'il propose ont joué un rôle essentiel dans la réalisation de notre validation expérimental. Nous sommes reconnaissants envers tous les membres du laboratoire pour leur collaboration, leur soutien technique et les échanges fructueux que nous avons eus.

Enfin nos remerciements vont à tous ceux qui ont contribué de quelque manière que ce soit à notre cheminement académique et à notre développement personnel.

REMERCIEMENT

Nous considérons comme un honneur d'avoir eu l'opportunité de travailler avec ces individus remarquables, dont les contributions significatives ont largement contribué à l'aboutissement de notre mémoire de Master. Leur soutien indéfectible a été d'une importance cruciale dans la concrétisation de nos travaux de recherche.

Résumé

La mise en œuvre de la protection cathodique à courant imposé par voie photovoltaïque est considérée comme l'une des solutions les plus efficaces pour prévenir la corrosion, notamment dans les industries du pétrole et du gaz. Dans le cadre de ce mémoire, des convertisseurs DC-DC et des techniques de contrôle et de commande ont été développées, reposant sur trois parties fondamentales tels que : une carte de commande basé sur le microcontrôleur DSPIC30F4011, deux convertisseurs DC-DC de puissance à savoir le convertisseur Buck et le convertisseur Buck-Boost. Des techniques de contrôle et de commande ont été expérimentées, afin de permettre un ajustement automatique de la tension de sortie appliqué à la charge, c'est-à-dire les différentes canalisations à protéger, afin de maintenir un courant de protection constant et d'assurer la polarisation cathodique des structures métalliques enterrées à une tension de -0,85 V. De plus, la gestion de la charge de la batterie ainsi que le suivi du point de puissance maximale du générateur photovoltaïque ont été implémentés grâce à des simulations approfondies.

Mots clés : Photovoltaïque, convertisseur DC-DC, commande, Protection cathodique.

Abstract

The implementation of cathodic protection through photovoltaic-driven current is considered one of the most effective solutions for corrosion prevention, particularly in the oil and gas industries. In the scope of this dissertation, DC-DC converters and control techniques have been developed, based on three fundamental circuits. These include a control card based on the DSPIC30F4011 microcontroller, two power DC-DC converters, namely the Buck converter and the Buck-Boost converter. Control and command techniques were experimented with to enable automatic adjustment of the output voltage applied to the load, i.e., the various pipelines to be protected, in order to maintain a constant protective current and ensure the cathodic polarization of buried metal structures at a voltage of -0.85V. Furthermore, battery charging management and tracking the maximum power point of the photovoltaic generator have been implemented through comprehensive simulations.

Key words : Photovoltaic, DC-DC converter, control, cathodic protection.

ملخص:

يعتبر تنفيذ حماية الكاثودية الكهروضوئية كواحد من أكثر الحلول فعالية لمنع تآكل الهياكل، خاصة في صناعات النفط والغاز. كجزء من هذه الأطروحة، تم تطوير نظام تنظيم ومراقبة، استنادًا إلى ثلاث دوائر أساسية: دائرة تحكم تستند إلى جهاز Buck-Boost. ودائرة Buck DC_DC ، وهي دائرة تعتمد على محول DSPIC30F4011 إلى متحكم التنظيم هذا بضبط اوتوماتيكي لضغط المحول وتحويلها للأنايبب المختلفة التي سيتم حمايتها، من أجل الحفاظ على تيار حماية ثابت وضمان الاستقطاب الكاثودية من الهياكل المعدنية المدفونة في جهد -0.85 فولت. بالإضافة إلى ذلك، تم تنفيذ إدارة حمولة البطارية وكذلك مراقبة الحد الأقصى لنقطة الطاقة للمولد الكهروضوئي بفضل المحاكاة في العمق

الكلمات الأساسية: الكهروضوئية ,محول DC DC ، دائرة تحكم , حماية كاثودية

Table des matières

Remerciement

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale..... 1

Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes de protection cathodique

I. Introduction..... 3

II. Phénomène de la corrosion..... 3

II.1. Mécanisme de corrosion 3

II.2. Origine et facteurs de la corrosion 3

II.3. Notion de potentiel..... 4

II.4. Types de corrosion 5

II.4.1. Corrosion interne 5

II.4.2. Corrosion externe 5

II.5. Aspect de corrosion..... 6

III. Corrosion des ouvrage enterrés..... 7

III.1. Pipelines..... 7

III.2. Corrosion dans le sol 7

IV. Protection et lutte contre la corrosion..... 8

IV.1. Approche passive 8

IV.1.1. Revêtement 8

IV.1.2. Utilisation d'inhibiteurs 8

IV.2. Approche active..... 8

IV.2.1. Protection cathodique 8

V. Généralités sur les systèmes photovoltaïques 12

V.1. Energie et effet photovoltaïque..... 12

V.2. Cellule photovoltaïque..... 13

V.2.1. Principe de fonctionnement..... 13

V.2.2. Caractéristiques 14

V.3. Module PV	15
V.4. Liaison d'un GPV à la charge.....	16
V.4.1. Liaison directe	16
V.4.2. Liaison à travers un convertisseur DC-DC	17
V.5. Système PV autonome	17
V.5.1. Système autonome sans batterie.....	17
V.5.2. Système autonome avec batterie	17
VI. Commande MPPT	20
VI.1. Principe de fonctionnement.....	20
VI.2. Algorithme Perturbation et Observation (P&O)	21
VII. Convertisseur statique DC-DC	22
VII.1. Principe de fonctionnement	23
VII.2. Commande PWM.....	24
VII.3. Type de convertisseur	25
VII.3.1. Hacheur réversible.....	25
VII.3.2. Hacheur non réversible.....	26
VIII. Conclusion	26
 Chapitre 2 : Modélisation des éléments constituant le système complet 	
I. Introduction.....	27
II. Description du système global.....	27
III. Modélisation du GPV	28
III.1. Modélisation d'une cellule PV	28
III.2. Modélisation du module PV	30
IV. Modélisation des convertisseurs	31
IV.1. Convertisseur Buck	31
IV.1.1. Principe de fonctionnement	31
IV.1.2. Dimensionnement et choix des composants	34
IV.2. Convertisseur Buck-Boost.....	36
IV.2.1. Principe de fonctionnement	37
IV.2.2. Dimensionnement et choix des composants	39
V. Modélisation et choix de la batterie	41
VI. Modélisation de la charge.....	42

VII. Conclusion..... 44

Chapitre III : Simulation et validation expérimentale

I. Introduction..... 45

II. Simulation du système 45

II.1. Système d'alimentation autonome 46

II.1.1. Simulation du GPV 46

II.1.2. Chargeur de batterie à commande MPPT 48

II.2. Gestion de charge et de décharge des batteries..... 52

II.3. Convertisseur de la protection cathodique 56

III. Validation expérimentale 58

III.1. DSPIC30F4011 59

III.2. Résultats en boucle ouverte 61

III.3. Résultats en boucle fermé..... 66

IV. Conclusion 68

Conclusion générale 69

Références bibliographiques 71

Liste des figures

Figure I.1 :	Classement des métaux selon leur résistance à la corrosion.....	4
Figure I.2 :	Schéma simplifié du mécanisme de la corrosion Electrochimique.....	6
Figure I.3 :	Diagramme de Pourbaix potentiel-PH du fer-eau.....	9
Figure I.4 :	Principe de la protection par anode sacrificielle.....	11
Figure I.5 :	Principe de la protection par courant imposé.....	11
Figure I.6 :	Structure d'une cellule PV	13
Figure I.7 :	Caractéristique courant-tension d'une cellule PV	14
Figure I.8 :	Constitution d'un générateur photovoltaïque	15
Figure I.9 :	Connexion directe d'un GPV avec la charge.....	16
Figure I.10 :	Chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque.....	17
Figure I.11 :	Système autonome avec batterie.....	18
Figure I.12 :	Cellule électrochimique de base.....	19
Figure I.13 :	Chaîne de conversion photovoltaïque avec une commande MPPT.....	21
Figure I.14 :	Organigramme représentant l'algorithme de la méthode P&O.....	22
Figure I.15 :	Schéma de principe d'un convertisseur DC-DC	23
Figure I.16 :	Les différents types de hacheur par rapport à la nature de source.....	23
Figure I.17 :	Tension et courant en mode de conduction continu MCC.....	24
Figure I.18 :	Tension et courant en mode de conduction discontinu MCD.....	24
Figure I.19 :	Principe de la commande MLI.....	25
Figure II.1 :	Organigramme du système complet à développer.....	27
Figure II.2 :	Modèle électrique d'une cellule photovoltaïque.....	29
Figure II.3 :	Schéma d'un hacheur série(Buck).....	31
Figure II.4 :	Circuit équivalent du convertisseur Buck pour interrupteur fermé.....	32
Figure II.5 :	Circuit équivalent du convertisseur Buck pour interrupteur ouvert.....	33
Figure II.6 :	Charge et décharge du condensateur de sorti.....	36
Figure II.7 :	Le schéma de base du convertisseur Buck-Boost.....	37
Figure II.8 :	Circuit équivalent du convertisseur Buck-Boost pour interrupteur fermé.....	37
Figure II.9 :	Circuit équivalent du convertisseur Buck-Boost pour interrupteur ouvert.....	38
Figure II.10 :	Forme de courant à travers le condensateur.....	40
Figure II.11 :	Circuit simplifié équivalent d'une PC par courant imposé.....	42
Figure III.1 :	Schéma bloc Simulink du système PC globale.....	45

Figure III.2: les caractéristiques I(V) et P(V) du module choisit.....	46
Figure III.3: Caractéristique du GPV pour différentes valeurs de températures.....	47
Figure III.4 : Caractéristique du GPV pour différentes valeurs d'éclairement.....	47
Figure III.5 : Le signal générer par le block Signal Builder pour varier l'irradiation.....	49
Figure III.6 : Puissance délivrée par le GPV par rapport à l'irradiation appliquée.....	49
Figure III.7 : Effet de l'irradiation sur le courant et la tension en sortie du convertisseur DC-DC Buck par rapport au contrôle de l'MPPT.....	50
Figure III.8 : Le signal générer par le block Signal Builder pour varier la température.....	50
Figure III.9 : Puissance délivrée par le GPV par rapport à la température appliquée.....	51
Figure III.10: Effet de la température sur le courant et la tension et en sortie du convertisseur DC-DC Buck par rapport au contrôle de l'MPPT	51
Figure III.11 : Schéma de simulation du bloc de la gestion de la charge et la décharge des batteries accumulateur.....	52
Figure III.12 : Résultat pour un état de charge (SOC) supérieur à 95%.....	53
Figure III.13 : Courant de charge de la batterie pour SOC supérieur à 95%.....	54
Figure III.14 : Résultat pour un état de charge entre 20% et 95%.....	54
Figure III.15 : Courant de charge de la batterie pour SOC entre 20% et 95%.....	55
Figure III.16 : Résultat de simulation pour pour un état de fonctionnement inférieur à 20%	55
Figure III.17 : Schéma de simulation sous MATLAB-Simulink du convertisseur de PC, le modèle du pipeline et le susystème de régulation	56
Figure III.18 : Tension et courant en sortie du convertisseur Buck-Boost pour différents rapport cyclique.....	57
Figure III.19 : Superposition et dynamique de réponse en courant de sortie du convertisseur par rapport aux courants de référence appliqués.....	57
Figure III.20 : DSPIC30F4011.....	59
Figure III.21 : Diagramme des pins du DSPIC30F4011.....	60
Figure III.22 : Les modes de génération de la PWM dans le DSPIC30F4011.....	61
Figure III.23 : Tension de sortie du convertisseur Buck pour un rapport cyclique de 5% ...	61
Figure III.24: Tension de sortie du convertisseur Buck pour un rapport cyclique de 50% ...	62
Figure III.25 : Tension de sortie du convertisseur Buck pour un rapport cyclique de 75% ...	62
Figure III.26: Le bon d'essai.....	63
Figure III.27: Courant et tension de sortie du convertisseur Buck-Boost pour un rapport cyclique de 10% et 20%.....	64

Figure III.28 : Courant et tension de sortie du convertisseur Buck-Boost pour un rapport cyclique de 30% et 40%.....64

Figure III.29 : Courant et tension de sortie du convertisseur Buck-Boost pour un rapport cyclique de 50%.....65

Figure III.30 : Courant et tension de sortie du convertisseur Buck-Boost pour un rapport cyclique de 60%65

Figure III.31 : Dynamique de réponse en courant du convertisseur pour un fonctionnement en boucle fermé.....67

Figure III.32 : Dynamique de réponse en courant du convertisseur par rapport aux variations de la charge.....67

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Caractéristiques du panneau photovoltaïque choisit.....	31
Tableau II.2 : Caractéristiques du générateur photovoltaïque utilisé	31
Tableau II.3 : Dimensionnement des étages de régulation utilisé dans le système	42
Tableau II.4 : Paramètres du circuit équivalent à la charge	43
Tableau III.1 : Grandeurs électriques du GPV pour différentes valeurs d'irradiation et de températures	48
Tableau III.2 : Fonctionnement de l'étage de supervision de la batterie	58
Tableau III.3 : Comparaison entre résultats théorique et résultat de simulation.....	63
Tableau III.4 : Résultats expérimentale boucle ouverte	70

Introduction générale

Les diverses structures métalliques telles que les canalisations de gaz, d'eau, les pipelines, etc., sont souvent sujettes à la détérioration causée par la corrosion, qui se définit comme la destruction d'un métal par des réactions chimiques ou électrochimiques. Une solution consiste à protéger le métal en le mettant en contact avec un autre métal, créant ainsi une pile et un courant s'écoulant entre les deux [1].

Un générateur est utilisé pour accélérer ce processus, diriger le courant dans la direction souhaitée et maintenir son intensité. Ce procédé de protection est connu sous le nom de protection cathodique. La mise en œuvre de cette méthode par l'utilisation d'un générateur photovoltaïque présente plusieurs avantages, notamment sa capacité à fonctionner efficacement dans toutes les conditions extérieures, en particulier dans des emplacements isolés où les installations sont souvent situées. Cette approche se révèle ainsi la plus avantageuse et la seule véritablement adaptée [2].

Dans ce contexte, le présent mémoire de Master qui s'inscrit dans le cadre du projet national de recherche « Conception d'un système de protection cathodique alimenté par un système hybride AC-PV » a pour objectif de dimensionner et de réaliser un convertisseur DC_DC dédié à la protection cathodique par courant imposé autonome, ce dernier soit alimenté par des panneaux photovoltaïques (PV).

Le présent mémoire est structuré en trois chapitres :

Le premier chapitre offre une vue d'ensemble des mécanismes de corrosion, des principes fondamentaux régissant les systèmes de protection cathodique, ainsi que des notions essentielles relatives aux systèmes photovoltaïques (SPV) et aux techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT). De plus, ce chapitre aborde spécifiquement les particularités des ouvrages enterrés, tels que les pipelines, et les défis associés à leur protection cathodique.

Le deuxième chapitre traite la modélisation des différents éléments constituant l'intégralité du système. Cette modélisation englobe les générateurs photovoltaïques (GPV), les batteries, les étages de convertisseurs DC-DC, ainsi que les dispositifs de protection cathodique. De plus, les différentes techniques de commande, telles que le suivi du point de puissance maximale (MPPT) et la modulation de largeur d'impulsion (PWM), sont abordées en détail dans le contexte de ces systèmes.

Et enfin, le dernier chapitre est consacré aux résultats de simulation de l'intégralité du système et à la validation expérimentale. Nous présenterons une discussion sur les résultats obtenus. Les données expérimentales et simulées sont analysées et évaluées pour évaluer l'efficacité du système de régulation de protection cathodique conçu.

Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes de protection cathodique

I. Introduction

L'utilisation des métaux et alliages est plus fréquente en industrie et parfois nécessaire comme pour le transport des hydrocarbures liquide et gazeux. En Algérie et à travers le monde, d'importants réseaux de pipelines ont été construits. Principalement conçu en aciers ces conduites sont exposées à des interactions avec les sols ayant pour conséquence la corrosion de celle-ci [1].

Dans cette partie du travail nous allons présenter des généralités sur le phénomène de corrosion et ses conséquences sur les ouvrages enterrés (pipeline), ainsi que les moyens de lutte et les systèmes de protection contre celle-ci et en particulier le système de protection cathodique par courant imposé qui est le cœur de ce projet.

II. Phénomène de la corrosion

La corrosion est défini comme étant un processus qui engendre une dégradation significative non voulue d'un substrat métallique (ou alliage) par une interaction physico-chimique entre le métal et son milieu environnant ou milieu corrosif (agents atmosphériques ou réactifs chimiques) [2].

II.1. Mécanisme de corrosion

Bien que les métaux se distinguent par un ensemble de propriétés avantageuses, leurs durabilité et instabilité au contact de l'air et de l'eau fait d'eux une proie facile à la corrosion et à l'usure. Ce phénomène correspond au retour de la matière à son état le plus stable ou son état naturel d'oxydes ou de minerais ce qui suscite des modifications dans les propriétés du métal et du système dont il fait partie [3].

II.2. Origine et facteurs de la corrosion

Les phénomènes de corrosion dépendent du matériau et du milieu environnant, et les paramètres qui provoquent celle-ci sont multiples et complexes on peut les classées en deux grandes catégories [4] :

- Des paramètres dépendant de la composition chimique et microstructure du métal (la composition de sa structure et microstructure, son état de surface, les contraintes ou sollicitations mécaniques appliquées).

- Des paramètres dépendant de la composition chimique et physique de l'environnement (le pH, son pouvoir oxydant, ses conditions atmosphériques et physiques, la présence de solutés).

Les paramètres déjà mentionnés sont toujours accompagnés par un facteur essentiel qui est le facteur de temps, car la durée où les métaux ont été exposés à ceux-ci est importante pour définir l'ampleur et la propagation de la corrosion dans la structure [5].

II.3. Notion de potentiel

La notion de potentiel ou potentiel redox est utilisée pour quantifier la tendance d'un métal à la corrosion, en effet plus l'énergie d'oxydation de celui-ci est importante plus il sera exposé à la corrosion, la corrosion des métaux est liée ainsi directement à leur potentiel comme montre la **Figure I.1** [6].

Bien qu'il est possible de mesurer le potentiel entre deux métaux différents, on préfère le mesurer par rapport à une électrode de référence qui consiste en une demi-pile dont le potentiel propre est connu et suffisamment stable quel que soit le milieu [6].

Il en existe plusieurs types, mais les plus répandus sont : l'électrode saturée en Cuivre/ Sulfate de Cuivre (CSE) pour le sol, l'électrode en Argent/ Chlorure d'Argent (SSC) pour l'eau de mer et l'électrode en Calomel Saturé (SCE) [7].

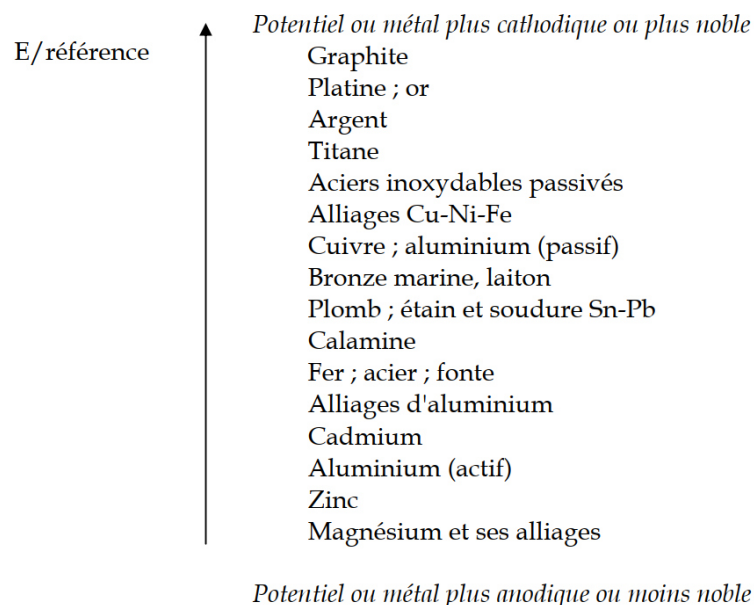


Figure I.1 : Classement des métaux selon leur résistance à la corrosion [6].

II.4. Types de corrosion

La classification de ce processus varie du point de vue de l'étude effectuée, mais en générale on distingue deux types principale par rapport à la localisation de la corrosion sur le métal : corrosion interne dite aussi bactérienne et corrosion externe généralement causées par des phénomènes électrochimiques et chimiques se produisant à la surface externe de la conduite, dans ce travail on s'intéresse à ce dernier [8].

II.4.1. Corrosion interne

Les pipelines transportent des fluides tels que le pétrole brut, le gaz naturel, les produits pétroliers raffinés et d'autres liquides ou gaz à travers de longues distances. Au fil du temps, l'exposition à ces produits peut entraîner la corrosion des parois internes des pipelines. La corrosion interne des pipelines peut être causée par plusieurs facteurs, notamment : la présence d'eau, les variations de température, la vitesse d'écoulement du fluide [5]

II.4.2. Corrosion externe

II.4.2.1. Corrosion chimique

La corrosion chimique ou autrement dit « Corrosion sèche » engendre la formation d'une couche d'oxyde superficielle par une réaction hétérogène entre une phase solide, et une phase gazeuse (air) donc sans la présence d'un milieu aqueux et sans l'intervention d'un courant électrique. Néanmoins elle nécessite une température très élevée ainsi que la présence de vapeur d'acides dans l'air qui représentent le milieu corrosif et plus globalement le CO₂. La corrosion chimique, le plus souvent elle est accompagnée de corrosion électrochimique [5, 9].

II.4.2.2. Corrosion électrochimique

La corrosion électrochimique ou humide est un processus lié à la structure de métal et à la structure du réactif qui est généralement un électrolyte, elle se manifeste lorsqu'il existe une hétérogénéité dans l'une des deux structures. [1]. Ce processus résulte d'une réaction d'oxydoréduction entre le métal (M) et un agent oxydant, d'une part les atomes du métal sous l'incidence d'un environnement corrosif se transforment en ions positifs (M⁺) qui quittent le métal pour passer dans le milieu ce changement d'état sera accompagner donc par la libération d'électrons (e^-) et c'est ce qu'on appelle une réaction d'oxydation ou réaction anodique.

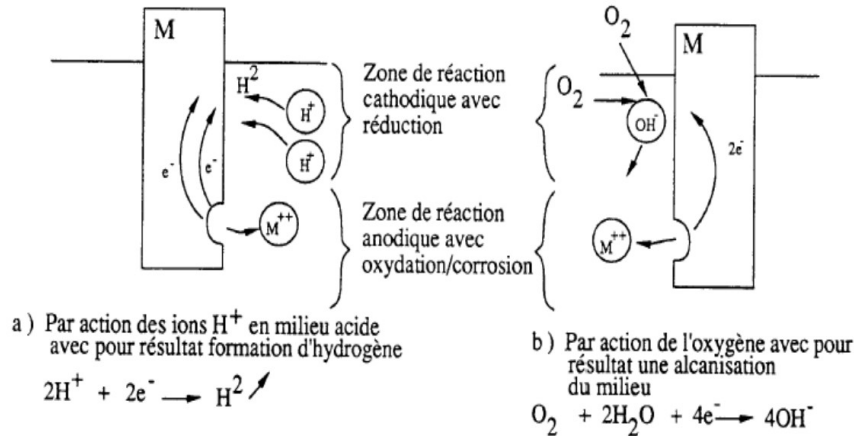


Figure I.2 : Schéma simplifié du mécanisme de la corrosion Electrochimique [8].

D'autre part, une deuxième réaction dite réaction de réduction ou cathodique aura lieu et qui est liée directement à la nature du milieu, car en réalité elle s'agit d'une réaction de décomposition de celui-ci qui va consommer les électrons émis par la réaction précédente dans le but de conserver la neutralité du milieu comme illustré la **Figure I.2** [2].

La superposition des réactions anodiques et cathodiques, s'accompagne de la circulation d'un courant électrique entre les deux zones de l'interface formant une cellule électrochimique qui contient des microcathodes et des microanodes en court-circuit créant alors des couples électriques ou des piles, c'est ainsi que les zones qui constituent les anodes sont attaquées (corrodées) [6].

II.5. Aspect de corrosion

En règle générale, la première méthode d'approche de la corrosion est visuelle. Selon leur apparence morphologique, la corrosion peut être divisée en deux grandes catégories [10] :

- **Corrosion uniforme** : ou dite aussi généraliser, elle se produit sur toute la surface du métal avec la même vitesse et est causée par une exposition prolongée à un milieu corrosif.
- **Corrosion localisée** : elle se produit dans des zones spécifiques de la surface du métal et peut prendre différentes formes, telles que la corrosion par piqûres, la corrosion galvanique, la corrosion filiforme, la corrosion par piqûres sous tension et la corrosion cavernueuse.

Il est important de comprendre les différentes formes de corrosion afin de pouvoir identifier le type de corrosion qui affecte un métal donné et prendre les mesures nécessaires pour prévenir ou contrôler la corrosion.

III. Corrosion des ouvrage enterrés

Le transport par canalisations est utilisé de plus en plus surtout dans la chaîne des hydrocarbures, ce qui nécessite l'exploitation des gisements et la construction de nouvelles lignes de pipelines, mais malheureusement ses conduites métalliques (enfouies dans le sol) tel que les pipelines, sont exposés au danger de la corrosion [8].

III.1. Pipelines

On désigne par « pipelines », les canalisations souterraines destinées au transport d'hydrocarbures pompables et qui transitent, sous des pressions relativement élevées. Celles-ci sont le plus souvent en acier et constituées d'éléments linéaires soudés bout en bout. L'oléoduc est le mode de transport massif le plus sûr et le moins coûteux sur longue distance et pour des volumes élevés. L'ordre de longueur de ces ouvrages est de quelques dizaines à plusieurs centaines de kilomètres [8].

III.2. Corrosion dans le sol

Le sol est défini comme un ensemble de composantes biologiques et chimiques tel que les sels qui se trouvent avec des quantités élevées, et qui peuvent avoir un effet défavorable en augmentant le taux de corrosion. Le sol humide peut être considéré comme un électrolyte de ce fait la corrosion d'un métal dans un sol résulte comme dans un électrolyte de l'activité de piles dites piles de corrosion mais, il faudra toutefois tenir compte des particularités de cet électrolyte qui consiste en un système hétérogène, ils présentent en effet, d'un site à l'autre, des caractéristiques très variées [11, 12].

D'une part le taux d'agressivité du sol pour les métaux peut être déduit par la mesure de sa résistivité électrique, et sa capacité d'adsorption ionique et sa rétention des cations (Ca, Mg, K, Na) qui varient essentiellement en fonction de son épaisseur, de sa teneur en argile et en matières organiques [8].

D'autre part le caractère corrosif du sol est en fonction de plusieurs paramètres tel que : sa perméabilité à l'air et à l'eau, son taux d'humidité, son acidité (c'est à dire le pH), sa conductibilité électrique [12].

IV. Protection et lutte contre la corrosion

Les pertes dû à ce phénomène sont considérable de ce fait l'emploi des techniques de protection adéquates contre la corrosion est indispensable surtout au niveau des ouvrages et installation souterraine. On distingue deux approches de protection :

IV.1. Approche passive

IV.1.1. Revêtement

Cette méthode consiste à couvrir la surface externe de la structure afin d'isoler celle-ci de son environnement (milieu corrosif), plusieurs types de revêtements sont utilisés [13] :

- **Revêtement métallique** : les revêtements métalliques remplissent souvent une fonction décorative. Il existe deux types soit anodique où le métal protecteur est moins noble que le métal à protéger, et cathodique où le métal protecteur est plus noble que le métal à protéger.
- **Revêtement organique** : il s'agit de l'application d'une matière plus au moins imperméable afin de créer une barrière protectrice tel que les peintures et vernis, les bitumes, et les revêtements polymériques.

IV.1.2. Utilisation d'inhibiteurs

Un inhibiteur est une substance qui retarde la corrosion lorsqu'elle est ajoutée à un environnement en faible concentration, leur domaine d'utilisation recouvre les milieux acides, la vapeur, et les eaux de refroidissement. Ils sont classés selon leur mode d'action de ce fait on trouve les Inhibiteurs minéraux et les Inhibiteurs organique [4].

IV.2. Approche active

La protection active est dite aussi protection électrochimique car elle agit de manière contrôlée sur les réactions d'oxydation et de réduction qui se produisent lors du phénomène de corrosion. On distingue deux types de protection active ; une protection cathodique au qu'elle on s'intéresse le plus car elle fait l'objet de ce projet ainsi que la protection anodique qui est moins utilisé vu la complexité de sa mise en œuvre [3].

IV.2.1. Protection cathodique

La protection cathodique est de loin la méthode la plus employée et qui contrôle électriquement le potentiel électrochimique du métal pour que la vitesse de corrosion devienne

négligeable. En effet, elle permet de réduire le potentiel de la structure métallique à protéger (entre les anodes et les cathodes) à une valeur suffisamment basse [7].

Pour bien visualiser l'application de la méthode de protection cathodique on se tourne vers l'interprétation des diagrammes de Pourbaix, qui permettent de repérer les conditions de potentiel électrochimique et de pH correspondant à la stabilité thermodynamique des différents états d'un métal dans notre cas le fer (l'acier est un mélange de fer et de carbone) que l'on peut rencontrer en solution aqueuse, **Figure I.3** [8].

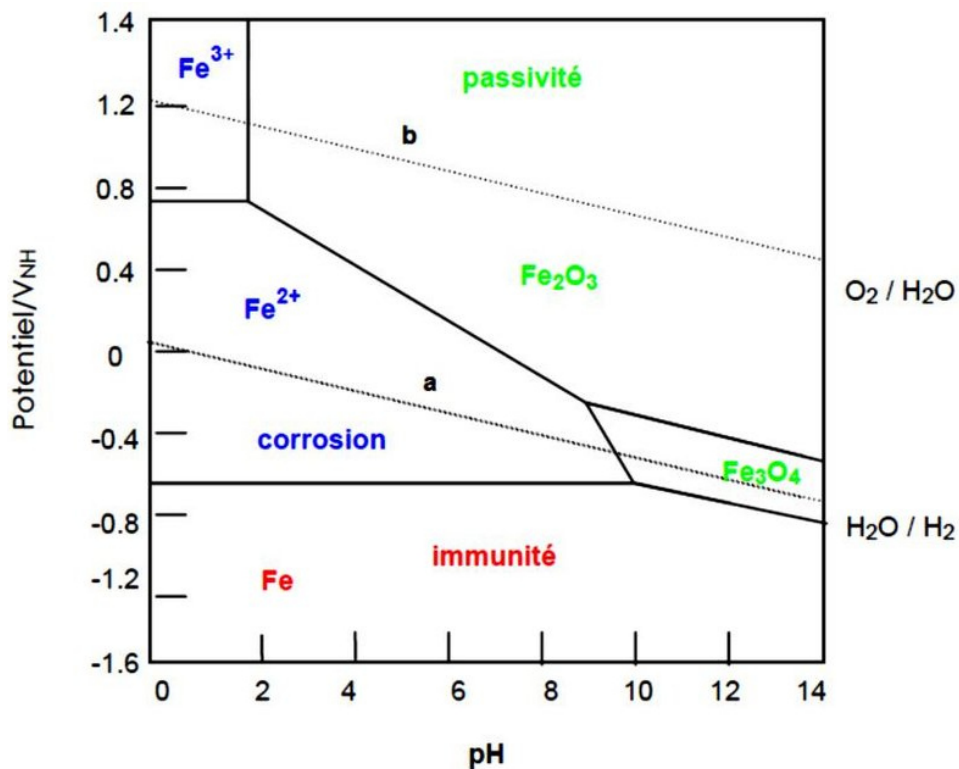


Figure I.3 : Diagramme de Pourbaix potentiel-PH du fer-eau [14].

Cette technique consiste alors à placer l'ouvrage à un potentiel électrique négatif tel que la corrosion devienne thermodynamiquement impossible, autrement dit abaisser le potentiel naturel du métal de la zone active vers la zone d'immunité. D'après le diagramme on admet le critère de **-850mV**, mesuré par rapport à l'électrode impolarisable au sulfate de cuivre en solution saturée [1].

La protection cathodique est caractéristique par : Le potentiel pris par la structure protégée, l'intensité du courant de protection, la résistance électrique des éléments du circuit [18] :

- **L'intensité du courant** : L'intensité du courant de protection est cruciale pour assurer une protection efficace d'une structure. Le potentiel de la structure est directement lié à cette intensité. Il est donc essentiel de maintenir le courant de protection à un niveau adéquat pour garantir une protection optimale de tous les points sensibles de la structure. Cependant, il est également important de bien dimensionner cette grandeur, afin d'éviter une consommation d'énergie excessive et inutile.
- **Potentiel de la structure** : Afin d'assurer la protection d'une structure, il est essentiel que son potentiel par rapport à l'environnement ambiant atteigne une valeur négative (-0,85 V pour l'acier par rapport à l'électrode de référence en cuivre-sulfate de cuivre), au-delà de laquelle la corrosion de l'acier cesse. Dans la pratique, une valeur de -1V est souvent choisie.
- **Résistance du circuit** : Pour minimiser les courants de protection, il est nécessaire d'isoler la structure de son environnement. Cela peut être réalisé en utilisant un revêtement qui agit comme un isolant électrique, ainsi que des joints isolants qui empêchent tout contact direct entre la structure et d'autres éléments métalliques.

L'abaissement de potentiel est assuré par le couplage électrique de l'ouvrage à protéger avec des anodes galvaniques (ou sacrificielles) constituées en matériau moins noble (systèmes galvaniques), ou par l'injection d'un courant électrique continu (systèmes à courant imposé).

IV.2.1.1. Anode sacrificielle

L'anode sacrificielle consiste à former une pile électrochimique avec le métal à protéger qui joue le rôle de cathode. En étudiant la série des potentiels de corrosion des métaux, on réalise que trois métaux (le zinc, l'aluminium et le magnésium) ont des potentiels plus négatifs que celui de l'acier et peuvent, de ce fait, servir d'anodes [15].

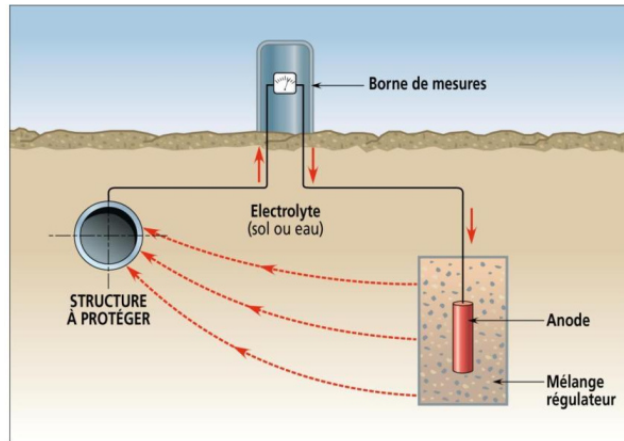


Figure I.4 : Principe de la protection par anode sacrificielle [15].

Comme illustré sur la **Figure I.4**, son principe est basé sur la connexion d'une anode ou une série d'anodes sacrificielles avec l'ouvrage à protéger en présence d'un milieu électrolytique conducteur (sol ou eau), la structure de métal se polarise négativement jusqu'à ce qu'elle atteigne un niveau de potentiel suffisant et uniforme qui assure l'immunité de la surface contre l'activité de corrosion. [18]. En effet pour assurer la protection des canalisations en acier par exemple on utilise des anodes sacrificielles en Zn, Mg ou Al ainsi que leurs alliages.

I.1.1.1. Courant imposé

Dans certaines situations de protection, les anodes sacrificielles ne peuvent pas délivrer suffisamment de courant pour une protection idéale, dans ce cas on utilise la protection par courant imposé ou par soutirage qui utilise l'alimentation électrique afin de polariser cathodiquement la structure à protéger en faisant circuler un courant continu entre l'ouvrage à protéger et une anode auxiliaire comme montre la **Figure I.5** [17].

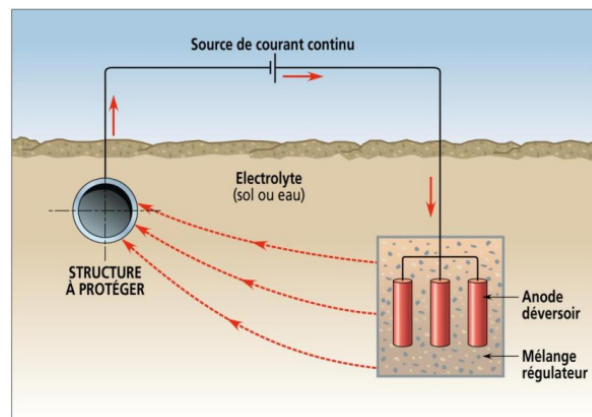


Figure I.5 : Principe de la protection par courant imposé [15].

Ce mode de protection en question utiliser dans ce projet est désigné sous l'appellation de "protection par soutirage". Son principe repose sur la connexion de l'ouvrage à protéger au pôle négatif d'une source à courant continu, tandis que le pôle positif est relié à une pièce conductrice enfouie à une certaine distance ou autrement dit un lit d'anode(en métal ou en graphite). Le courant électrique, émis par cette pièce - appelée "déversoir" - se propage dans le sol, atteint la canalisation, puis circule à travers le métal de celle-ci pour retourner au générateur. La conduite est ainsi rendue négative par rapport au sol [9].

Le déversoir est constitué d'un ensemble d'anodes dit lit d'anode, et a pour rôle d'injecter le courant de protection cathodique dans le sol, Il doit donc être constitué de matériaux conducteurs de courant. , il est soumis aux phénomènes d'oxydation puisqu'il se comporte comme une anode, de ce fait la masse du matériau constituant celui-ci devra être déterminé pour que l'installation ait une durée de vie importante [18].

La phase initiale du processus de conception implique l'acquisition et l'analyse des données pertinentes relatives à la structure, à ses propriétés de fonctionnement et à son milieu environnant, en vue d'établir la quantité de courant cathodique nécessaire pour atteindre le niveau de protection requis. Autrement dit, il s'agit de déterminer le courant que la structure doit recevoir pour atteindre son seuil de protection [15].

Étant donné que la méthode de protection cathodique par courant imposé nécessite une source de courant continu en permanence, il est impératif que l'installation soit connectée à un des systèmes qui offre cette possibilité tel qu'un système photovoltaïque qui sera utilisé pour alimenter le système à développer.

V. Généralités sur les systèmes photovoltaïques

V.1. Energie et effet photovoltaïque

L'Energie solaire est l'une des énergies renouvelables qui utilise le soleil comme source, elle peut être exploitée sous différentes formes soit thermique, thermodynamique ou photovoltaïque qui consiste à générer de l'énergie électrique à partir d'une énergie lumineuse (ondes électromagnétique) par l'absorption de l'énergie des photons par un matériau (en particulier les semi-conducteurs), on parle alors de l'effet photovoltaïque [19].

Ce processus physique se déclenche lorsqu'un assemblage de semi-conducteur de type opposé appelé cellules photovoltaïques est exposé à la lumière du soleil provoquant la

libération d'électrons (électrons des couches de valence) et de trou au voisinage de la jonction illuminé, leurs déplacements créent un courant électrique continue [20].

V.2. Cellule photovoltaïque

La cellule PV est un composant optoélectronique qui est la base des installations produisant cette énergie, il est fabriqué à base d'un semi-conducteur. Les semi-conducteurs ont la particularité et le pouvoir de laisser passer des électrons de la couche de valence vers la couche de conduction lorsqu'ils reçoivent une énergie égale ou supérieure à l'énergie de transition dite de gap qui lui permet de traverser la bande interdite telle que l'énergie issue du photon de lumière [20].

V.2.1. Principe de fonctionnement

Les cellules PV comporte deux parties de matériau semi-conducteur, l'une dopé N présentant un excès d'électrons et l'autre dopé P présentant un déficit en électrons. Au contacte il se crée donc un champ électrique (une différence de potentiel) qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P formant ainsi une jonction P-N [21].

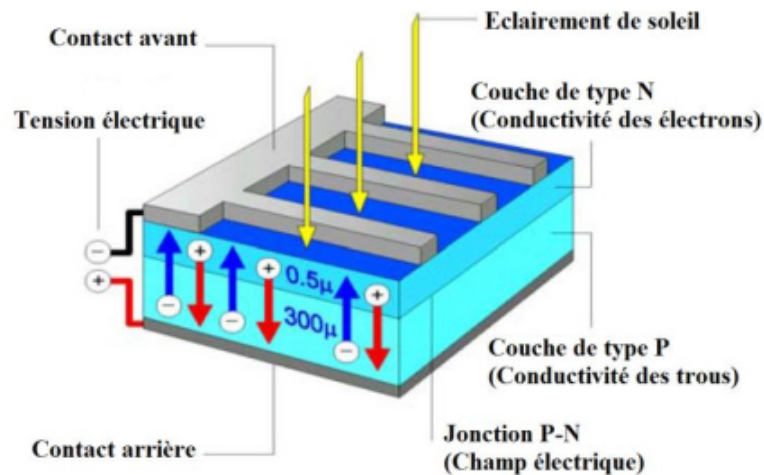


Figure I.6 : Structure d'une cellule PV [22].

Ainsi, lorsque la jonction est éclairée, les photons constituant celle-ci transfèrent leur énergie aux atomes du matériau engendrant ainsi une paire électron-trou, mais le champ électrique créé au voisinage de la jonction va contribuer à séparer ces paires et pousser les électrons à choisir un autre chemin pour rejoindre les trous d'où l'intérêt des couches de contact (grille) déposées à la surface de la cellule qui sont à base de matériau conducteur. La structure de celle-ci est illustrée sur la Figure I.6 [24].

La connexion d'une charge à cette cellule permet le déplacement de ces électrons qui sont délivrés sous la tension créée par la jonction (Photo-tension) implique une production d'électricité (un photo-courant). Plus la cellule absorbe de l'énergie, plus la quantité d'électricité produite est importante [25].

V.2.2. Caractéristiques

Pour déterminer les propriétés électriques de la cellule PV on fait appel au graphe courant-tension illustré **Figure I.7** dans la, notons bien que ses caractéristiques sont définies dans des conditions de test bien précises (STC = Standard Test Conditions : émission lumineuse de 1 000 W/m², température de 25 °C) [24].

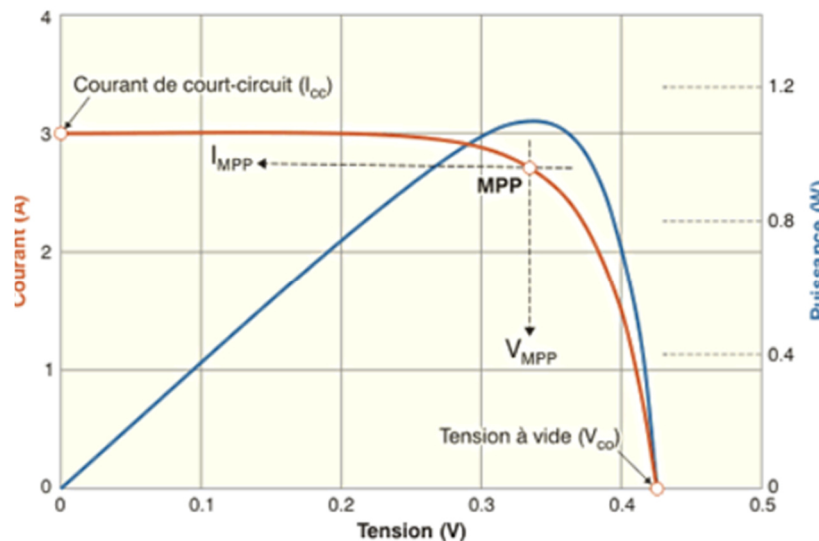


Figure I.7 : Caractéristique courant-tension d'une cellule PV [24].

On peut constater que la courbe courant-tension $I(V)$ de la cellule PV est non linéaire, on définit dans ce qui suit quelques points importants qui caractérisent électriquement celle-ci [23] :

- **Point de puissance maximum MPP** : Il s'agit de la puissance maximale obtenue pour une tension et un courant optimal (V_{mpp} , I_{mpp}) ;
- **Courant de court-circuit** : il s'agit du courant I_{cc} qui traverse la cellule photovoltaïque éclairée lorsque celle-ci est raccorder à elle-même c'est à dire en court-circuit, la puissance fournie par la cellule dans ce cas est nulle ;

- **Tension à vide** : il s'agit de la tension V_{oc} générée par une cellule éclairée non raccordée, c'est-à-dire lorsque celle-ci est en circuit ouvert et elle dépend principalement de la température de la cellule ;
- **Facteur de forme** : Il s'agit du rapport FF entre la puissance du MPP et le produit $V_{oc} \cdot I_{cc}$, il permet de démontrer la qualité d'une cellule et il dépend fortement de la température ;
- **Rendement η** : On parle plus souvent du rendement d'un module PV, cette valeur dépend des conditions d'exploitation de celui-ci et elle définit comme le rapport entre la puissance maximal délivré par le module et la puissance radiative (éclairage W/m^2 multipliée par la surface du module).

Notons qu'il existe trois types principale de cellule photovoltaïque sur le marché mondial soit monocristallin, poly cristallin ou amorphe. Ils sont généralement faits de silicium sous ses différentes formes, on les particularise en fonction du procédé de fabrication et le cout, le rendement, et la durée de vie [25].

V.3. Module PV

La cellule PV est l'unité de base d'un système photovoltaïque, néanmoins elle est rarement utilisé seule car elle ne produit qu'une faible puissance électrique, précisément entre 1 et 3 W avec une tension de moins d'un volt. Ainsi, afin d'accroître la puissance disponible et l'énergie produite par des cellules PV celle-ci sont assemblées en série (augmenter la tension) ou en parallèle (accroître le courant) pour former un module ou panneau, le plus souvent un module PV comporte de 36 à 72 cellules en série dans un module [23].

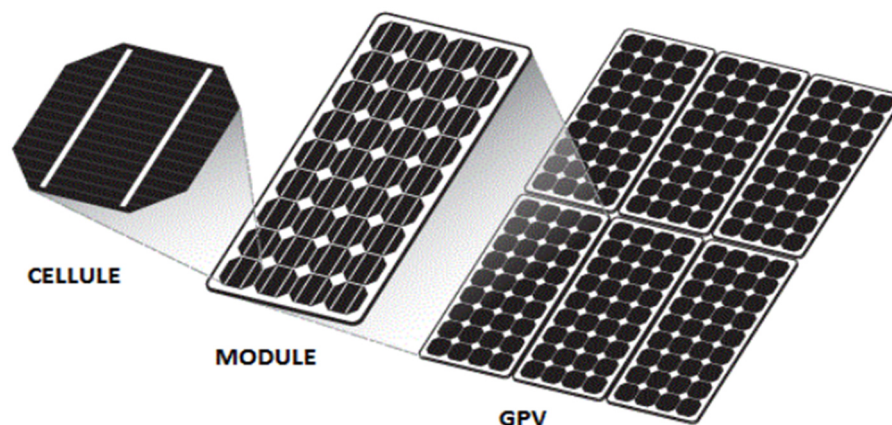


Figure I.8 : Constitution d'un générateur photovoltaïque [19].

Afin d'avoir une puissance plus importante, on peut relier les panneaux entre eux formant ainsi ce qu'on appelle un générateur photovoltaïque GPV comme montre la **Figure I.8**.

Le générateur PV est un dispositif constitué d'un certain nombre de modules (ou un seule module) interconnectés entre eux en série ou en parallèle selon la puissance crête souhaité. Habituellement les modules PV sont branchés en série-parallèle pour augmenter la tension ainsi que l'intensité du courant à la sortie du générateur [19].

V.4. Liaison d'un GPV à la charge

Tous dépend de l'utilisation, du cout et des performances recherchées, plusieurs solution s'avance pour exploiter l'énergie délivré par le GPV et le connecter à sa charge, soit de la manière la plus simple en connexion directe, soit en implémentant un étage d'adaptation former généralement d'un convertisseur statique, un système de commande.

V.4.1. Liaison directe

Comme illustre la **Figure I.9** ce type de connections est simple et ne nécessite qu'une diode qu'on appelle une diode anti retour qui sera insérée entre le GPV et la charge, et qui sert comme son nom l'indique à éviter que le GPV devienne récepteur lorsqu'il n'est plus éclairé, l'avantage majeur de Cette solution est son faible coût [26].

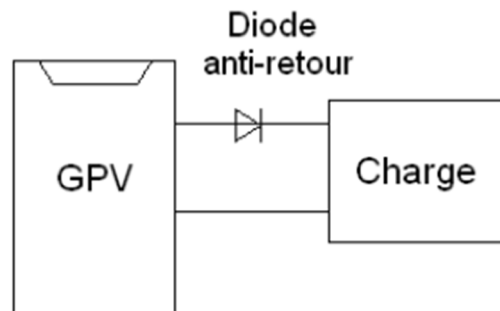


Figure I.9 : Connexion directe d'un GPV avec la charge [26].

Cependant Il n'est pas possible de contrôler la tension ou le courant de charge surtout dans le cas où la charge est une batterie car c'est la tension de celle-ci qui fixera le point de fonctionnement du système, et qui ne se situe pas forcément sur le PPM du GPV, ainsi on ne va pas exploiter toute la puissance délivrer par le GPV [26].

V.4.2. Liaison à travers un convertisseur DC-DC

Les caractéristiques I-V du générateur photovoltaïque dépendent essentiellement du niveau d'éclairement et de la température de celui-ci, et pour s'assurer que la charge reçoit le maximum de puissance du PV à chaque moment, on doit introduire un étage de régulation qui permettra au générateur photovoltaïque de fonctionner à son point de puissance maximale MPP selon les variations météorologique, **Figure I.10** [27].

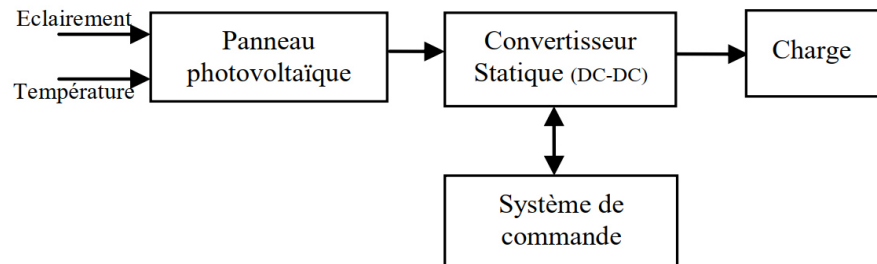


Figure I.10 : Chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque [28].

Cet étage est constitué généralement d'un convertisseur statique DC-DC selon l'objectif du système dans le but d'optimiser les niveaux des tensions, accompagné le plus souvent par un système de commande MPPT (Maximum Power Point Tracker) qui permet le suivi du point de puissance maximum par l'implémentation d'un algorithme de commande[26].

V.5. Système PV autonome

Les systèmes autonomes sont définis comme auto-systèmes suffisants c'est-à-dire ils ne sont pas connectés au réseau. On distingue deux types de système autonome [29] :

V.5.1. Système autonome sans batterie

Contrairement au système autonome avec batterie, ces systèmes ne requièrent pas de stockage d'électricité, parce qu'ils sont utilisés généralement pour des charges qui ne consomment pas beaucoup d'énergie ainsi la production d'énergie des cellules est suffisante même sous un faible éclairage [29].

V.5.2. Système autonome avec batterie

En plus du système d'extraction de la puissance maximale, les systèmes photovoltaïques autonomes avec batterie sont dotés d'un dispositif de stockage, celui-ci est équipé à son tour d'un gestionnaire de la puissance. Lorsque la puissance délivrée par le panneau

PV ne répond pas au besoin de la charge, ce dispositif fournit cette différence de puissance, et dans le cas opposé l'excès de puissance va servir pour charger le dispositif de stockage [29].

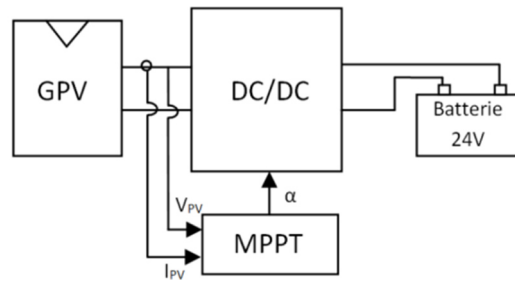


Figure I.11 : Système autonome avec batterie [26].

V.5.2.1. Batterie

Une batterie, également connue sous le nom d'accumulateur, est un ensemble d'accumulateurs électrochimiques. Un accumulateur électrochimique est un dispositif réversible capable de stocker de l'énergie électrique sous forme chimique et de la restituer lorsque nécessaire grâce à la réversibilité de la réaction chimique qui s'y produit.

Cette réaction se produit à l'intérieur d'une cellule élémentaire « Cellule électrochimique » composée de deux électrodes immergées dans un électrolyte. Lorsqu'une charge est connectée aux bornes de la cellule, la réaction électrochimique est activée [30].

- **Principe de fonctionnement**

La chaîne électrochimique agit comme un générateur de courant en convertissant l'énergie chimique en énergie électrique. Les réactions électrochimiques se produisent au niveau de ces électrodes [31].

Lorsqu'une batterie se décharge, une réaction d'oxydation se produit à l'anode, libérant un ou plusieurs électrons dans le circuit externe. Ces électrons circulent ensuite jusqu'à la cathode, où ils participent à une réaction de réduction, gagnant ainsi un ou plusieurs électrons. Pendant ce temps, les anions et les cations se déplacent dans la solution électrolytique entre les deux électrodes pour maintenir l'équilibre des charges. Lorsque l'anode est complètement oxydée (ou que la cathode est totalement réduite), ces réactions se terminent et la batterie est déchargée. Pour la recharger, un courant électrique est appliqué aux électrodes, provoquant les réactions inverses [30].

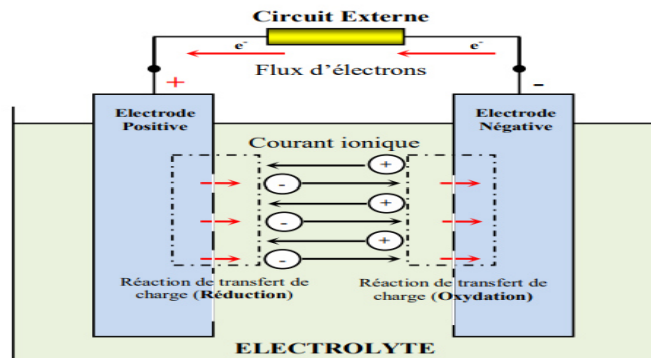


Figure I.12 : Cellule électrochimique de base [30].

- **Caractéristique d'une batterie**

- 1. Capacité de stockage**

La capacité de stockage (C) d'une batterie est mesurée en ampères-heures (Ah) et correspond à la quantité de charge électrique disponible lors d'une décharge complète de la batterie, à un courant constant, après avoir été initialement chargée [31].

- 2. Tension à vide**

La tension à vide, également appelée tension en circuit ouvert, fait référence à la tension équilibrée de la batterie lorsqu'elle est en état de repos. Elle est déterminée par la différence de potentiel d'équilibre entre les deux électrodes de la batterie [31].

- 3. Durée de vie**

Les performances des batteries ont tendance à diminuer progressivement tout au long de leur durée de vie. Elles sont considérées en fin de vie lorsque leurs performances ne répondent plus aux exigences requises pour l'application spécifique à laquelle elles sont destinées [31].

- 4. Profondeur de décharge et état de charge**

Le SOC (State of Charge), exprimé en pourcentage (%), est une mesure qui indique la proportion de la capacité restante par rapport à la capacité nominale de la batterie. Il représente ainsi la quantité d'énergie encore disponible dans la batterie.

La profondeur de décharge (DOD), également exprimée en pourcentage(%), quantifie la proportion de la capacité déjà utilisée par rapport à la capacité nominale de la batterie, reflétant ainsi l'énergie consommée de la batterie [32].

5. Autodécharge

Les batteries au plomb ont une tendance intrinsèque à se décharger progressivement lorsqu'elles sont laissées en circuit ouvert, c'est-à-dire sans charge ni décharge active. Le taux d'autodécharge de ces batteries varie généralement entre 0,1% et 0,5% de leur capacité nominale par jour, à une température de 20°C [32].

6. Le cyclage

La durée de vie d'une batterie est étroitement liée au nombre de cycles de charge/décharge. Effectivement, chaque cycle de charge et décharge d'une batterie entraîne un léger affaiblissement de sa capacité. Cet affaiblissement est plus prononcé lorsque la décharge est profonde, c'est-à-dire lorsque la batterie est utilisée jusqu'à un niveau de charge très bas [32].

VI. Commande MPPT

La puissance fournie par un module photovoltaïque dépend de plusieurs paramètres (ensoleillement, la température, l'ombrage et la nature de la charge alimentée), cette dépendance rend la position du MPP variable dans le temps. Cependant un panneau photovoltaïque doit délivrer le maximum de sa puissance à tout moment et quel que soit les conditions de fonctionnement, de ce fait un étage d'adaptation doit être utilisé entre le GPV et la charge, ce dernier comporte un convertisseur statique qui sera commandé par une commande dite MPPT qui va maintenir le point de fonctionnement du panneau aux alentours de la zone de puissance maximale [33].

VI.1. Principe de fonctionnement

Recherche du point de puissance maximal ou Maximum Power Point Tracking MPPT est une commande associée généralement à un étage intermédiaire d'adaptation permettant au GPV de générer en permanence sa puissance maximale quels que soient les conditions météorologiques, autrement dit cette technique permet d'optimiser le rendement du module PV [21].

L'adaptation est souvent sous forme d'un convertisseur DC – DC (interface de puissance) comme montre la **Figure VI.13**, typiquement la technique de contrôle utilisée consiste à variée rapport cyclique D à l'aide d'un signal électrique approprié, de manière à maximiser continuellement la puissance de fonctionnement à la sortie du générateur photovoltaïque qu'elles que soient les mobilités météorologiques [33].

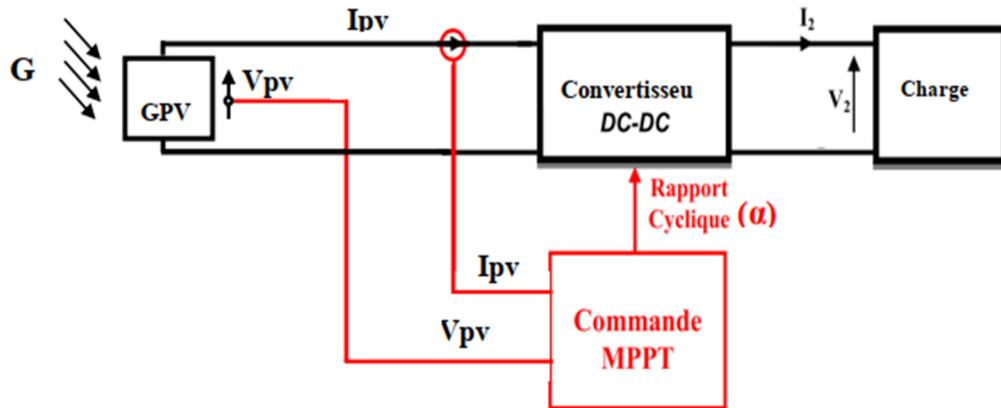


Figure I.13 : Chaine de conversion photovoltaïque avec une commande MPPT [34].

Dans la littérature, plusieurs techniques de commandes dite à MPPT sont utilisées pour adapter les générateur PV avec les bus continus ou à la charge DC-DC tel que Incrémentale conductance, Recherche en grille, Perturbation fractionnelle, Modélisation de la série de résistance, variation de la fréquence (FSPT) et Perturbation et Observation (P&O) Notre choix s'est porter sur l'algorithme perturbe et observe en vue sa simplicité et son efficacité [34].

VI.2. Algorithme Perturbation et Observation (P&O)

Le principe de base de la technique P&O est simple. Elle consiste à perturber la tension ou le courant du système pour déterminer la direction dans laquelle le point de puissance maximale se déplace, puis ajuster la perturbation en conséquence jusqu'à ce que le point de puissance maximale soit atteint, [28]

Après la perturbation, la puissance fournie par le panneau PV à l'instant k est calculée et comparée à celle de l'instant précédent ($k-1$). Si la puissance augmente, cela indique que l'on se rapproche du point de maximum de puissance (PPM) et la variation du rapport cyclique est maintenue dans le même sens. En revanche, si la puissance diminue, cela signifie que l'on s'éloigne du PPM, et il est alors nécessaire d'inverser le sens de la variation du rapport cyclique comme montre la **Figure I.14** [45].

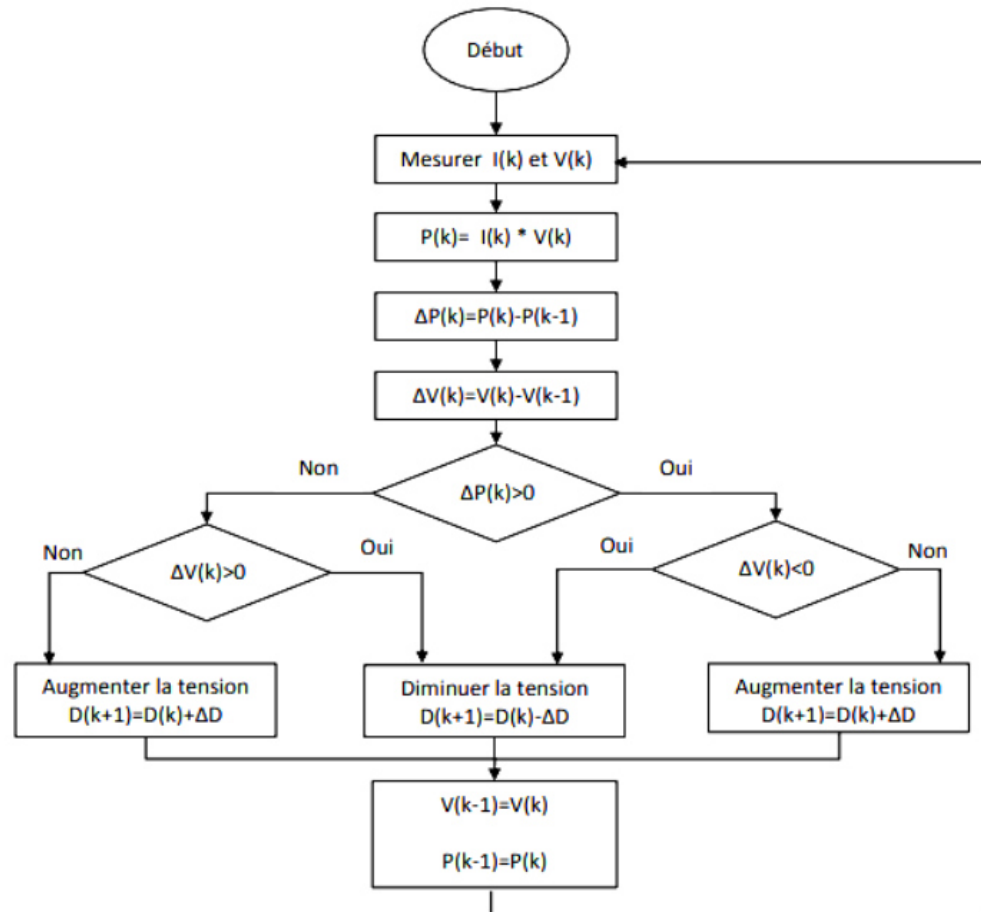


Figure I.14 : Organigramme représentant l'algorithme de la méthode P&O [45].

Le bon choix du pas est primordiale car dans le cas où celui-ci est grand, l'algorithme de MPPT offre une repense rapide lors des changements brusque des conditions, mais occasionneras des pertes pour les changements lent et les états stable. En revanche, si ce pas est très petit, l'algorithme réduit les pertes dans les états stables ou les conditions changeantes lentement, mais le système répondra lentement aux changements rapides. La valeur idéale de la largeur du pas ne peut être déterminée que par expérimentation ou simulation, afin de satisfaire un compromis entre la réponse rapide et les pertes de puissance dans les états stables [45].

VII. Convertisseur statique DC-DC

Un convertisseur statique DC-DC est un système permettant la modulation énergie entre une source et un récepteur à courant continu (une source variable à partir d'une source fixe) comme montre la **Figure I.15**. On distingue deux types principaux soit les alimentations à découpage qui sont utilisé dans des applications à petites puissances utilisant un

transformateur galvanique, soit les hacheurs qui sont des convertisseurs non isolés qui sont adéquat aux applications moyennes et fortes puissances et sur lesquels est basé ce travail [35].

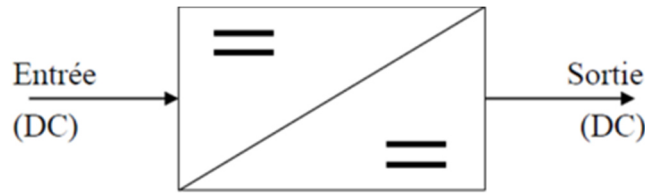


Figure I.15 : Schéma de principe d'un convertisseur DC-DC [35].

On est amené souvent à utiliser la topologie non isolé et selon la nature de la source et de la charge on peut les classer en deux familles, des hacheurs qui relient deux sources de nature différente dit « direct » (série, parallèle) ou qui associe deux sources de même nature dit « indirect » basé sur le principe d'accumulation (inductif, capacitif) comme montré sur la **Figure I.16** [36].

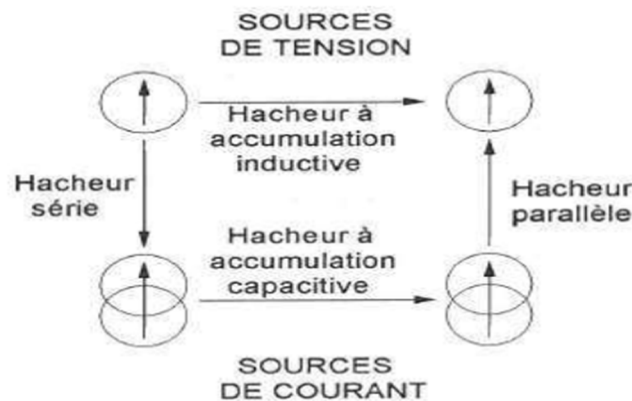


Figure I.16 : Les différents types de hacheur par rapport à la nature de source [36].

VII.1. Principe de fonctionnement

Les convertisseurs statique DC-DC comportent essentiellement des interrupteurs électroniques unidirectionnels réalisés à partir de semi-conducteurs tels que : la diode, les transistors, thyristor qui fonctionnent en régime de commutation. Ces derniers permettent l'ouverture ou la fermeture d'un circuit électrique de puissance, grâce à un signal de commande extérieur (PWM) et avec une fréquence de commutation souvent fixe. On définit le rapport cyclique (Duty Cycle) comme étant le rapport entre la durée de fermeture de l'interrupteur T_{on} et la période de commutation T , celui-ci est compris entre 0 et 1 [35].

On utilise également des composants qui ne consomment aucune puissance active (à dissipation minimale) tels que les conducteurs, les inductances [22]. Le fonctionnement du convertisseur est basé sur la charge et la décharge de l'inductance de lissage (capacité de stockage d'énergie), de ce fait on distingue 2 modes de conduction de fonctionnement [37] :

- **Mode Continu MCC** : Dans ce mode de conduction le courant dans l'inductance L est continu, donc pour une période de commutation celui-ci est entièrement transféré à la charge sans s'annuler, **Figure I.17**.

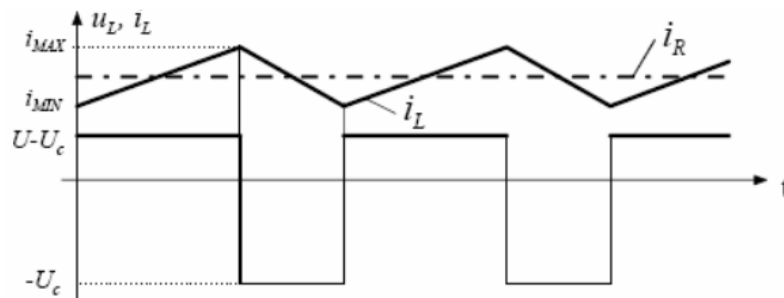


Figure I.17 : Tension et courant en mode de conduction continu MCC [38].

- **Mode Discontinu MCD** : Contrairement au mode continu, il y a une discontinuité du courant dans l'inductance dû au fait qu'avant la fin de la période de commutation l'énergie emmagasinée dans l'inductance L est entièrement transférée à la charge, **Figure I.18**.

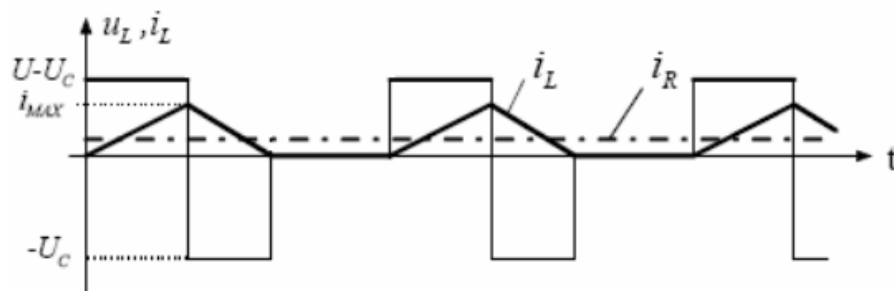


Figure I.18 : Tension et courant en mode de conduction discontinu MCD [38].

VII.2. Commande PWM

La commande PWM (Pulse Width Modulation) ou MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion en français) est une technique de commande de signal utilisée en électronique de puissance pour contrôler la puissance électrique fournie à une charge. Cette technique consiste

à moduler la largeur d'une impulsion de tension, tout en maintenant la fréquence du signal de sortie constante. Le rapport cyclique détermine la puissance électrique moyenne délivrée à la charge, et peut être ajusté pour faire varier la puissance fournie [41].

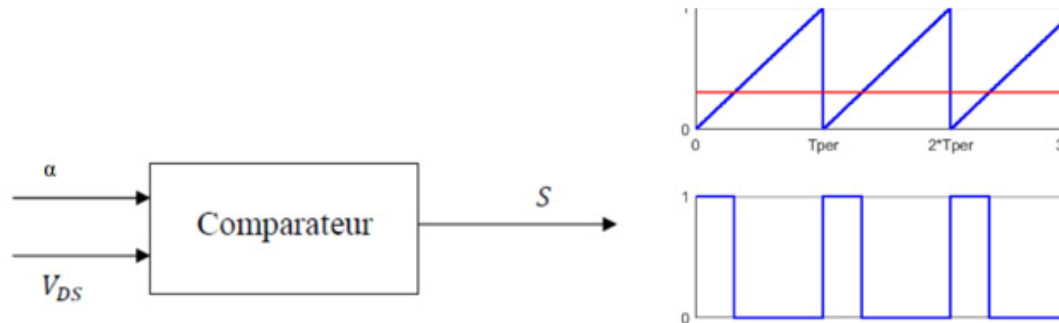


Figure I.19 : Principe de la commande MLI [35].

Le principe de fonctionnement de la commande PWM est relativement simple. Elle consiste à générer un signal carré à une fréquence donnée, appelée fréquence de commutation f_s (*switching frequency*), et à varier la durée de l'état haut de ce signal en fonction du niveau de tension ou de courant souhaité en sortie. Pour cela, on utilise un comparateur comme montre la **Figure I.19** qui compare la valeur du rapport cyclique D et la tension V_{ds} d'un signal de dent de scie. Le résultat de cette comparaison est un signal binaire (0 ou 1) qui est ensuite envoyé à l'entrée de commande d'un interrupteur électronique [42].

Lorsque le signal de commande est à l'état haut, l'interrupteur est fermé et laisse passer le courant. Lorsqu'il est à l'état bas, l'interrupteur est ouvert et le courant ne passe plus. Ainsi, en ajustant la fréquence de commutation et le rapport cyclique du signal de commande on peut contrôler avec précision la puissance électrique fournie à la charge, et ce de manière efficace et précise [41].

VII.3. Type de convertisseur

Les hacheurs peuvent également être classés en hacheurs réversibles et non réversibles en fonction de leur capacité à inverser le flux de courant dans la charge [43].

VII.3.1. Hacheur réversible

Un hacheur est dit réversible s'il est capable d'inverser la polarité de la tension appliquée à la charge en inversant la polarité du courant qui la traverse. Il peut être utilisé pour contrôler

la vitesse et la direction de rotation d'un moteur électrique, par exemple. Les hacheurs réversibles les plus couramment utilisés sont le pont en H et le pont en H complet [43].

VII.3.2. Hacheur non réversible

En revanche, un hacheur non réversible ne peut pas inverser la polarité de la tension appliquée à la charge. Il est utilisé pour réduire ou augmenter la tension de sortie en fonction de la tension d'entrée, mais ne peut pas inverser la direction du courant. Les hacheurs non réversibles les plus couramment utilisés sont le hacheur abaisseur (Buck), le hacheur éleveur (Boost) [43].

VIII. Conclusion

Ce chapitre présente des généralités sur les systèmes de protection cathodique autonome ainsi que les différents constituants qu'ils comportent. Dans le chapitre suivant, nous procéderons à la description de l'architecture globale du système étudié ainsi que la modélisation de ce dernier.

Chapitre 2 : Modélisation des éléments constituant le système complet

I. Introduction

La mise en place des systèmes de protection des ouvrages enterrés, tels que les pipelines, nécessite une source d'énergie électrique. Cependant, ces ouvrages traversent souvent des zones désertiques ou dépourvues d'électricité. L'énergie photovoltaïque est souvent privilégiée comme solution pour résoudre cette problématique, car elle est parfaitement adaptée aux conditions environnementales dans lesquelles elle est mise en place [40].

Dans ce chapitre, un travail de modélisation est appliqué aux différents constituant du système la protection cathodique alimenté par des panneaux PV à s'avoir les panneaux eux-mêmes, les convertisseurs d'électroniques de puissances et la charge, ainsi qu'aux systèmes de contrôle et commande.

II. Description du système global

L'architecture globale du système de protection cathodique étudié est schématisée par la **Figure II.1**. Un modèle de simulation, ainsi qu'une partie d'expérimentation est réalisé pour concevoir un étage d'un convertisseur DC-DC de type multicellulaire applicable au système de protection cathodique. Suivant le potentiel de polarisation de la structure métallique à protéger, un courant électrique doit être fourni pour polariser adéquatement la structure.

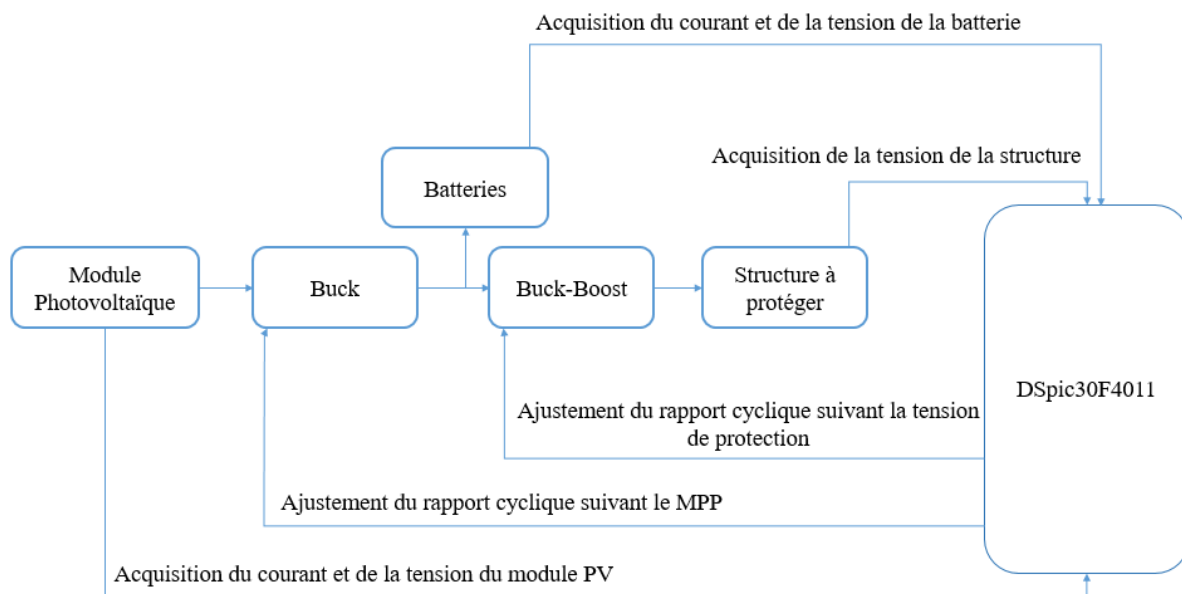


Figure II.1 : Organigramme du système complet à développer.

Le système est constitué de trois partis essentiels :

1. Un champ de module photovoltaïque sera dimensionné de manière à garantir le fonctionnement autonome de la protection cathodique suivant la charge et les différents étages d'adaptation.
2. Un parc de batteries pour stocker l'énergie électrique générée par les modules photovoltaïques. La capacité de ces batteries est dimensionnée pour une autonomie de deux (02) jours ;
3. Un étage de régulation alimenté à partir des batteries, il s'agit d'un circuit BUCK-BOOST qui agit autant qu'un régulateur de charge permettant de fournir à la structure protégée la tension requise.

Tout ce dispositif sera contrôlé par un microcontrôleur de type DSPic30F4011 comme montre la **Figure II.1**, qu'aura pour rôle d'ajuster le rapport cyclique du dévolteur suivant le point de puissance maximal du module PV MPP par l'implémentation d'un algorithme. Mais aussi il assure l'ajustement de la tension (DC) du régulateur de charge via la PWM de ce dernier afin d'atteindre la tension d'immunité de la structure à protéger qui est calculée préalablement.

Comme expliqué précédemment, la partie expérimentale constitue uniquement l'étage d'adaptation de la protection de PC, néanmoins nous allons faire l'étude, la modélisation et la simulation de tout le système décrit ci-dessus.

III. Modélisation du GPV

III.1. Modélisation d'une cellule PV

La cellule PV est représentée dans le cas idéal par un générateur de courant I_{ph} induit par le flux lumineux relié en parallèle avec une diode qui représente la jonction PN du semi-conducteur. Dans le cas réel par contre, il y a plusieurs modèles de circuits électriques d'une cellule photovoltaïque

En générale, ce circuit introduit des résistances parasites série r_s et parallèle r_p de plus par rapport au circuit idéal afin de tenir compte des phénomènes dissipatifs dans la cellule, comme montre la **Figure II.2** [34].

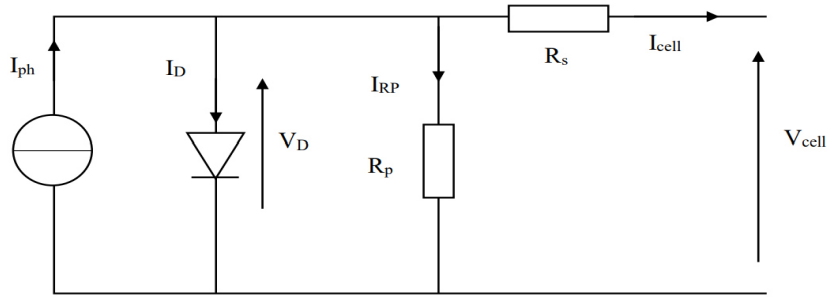


Figure II.2 : Modèle électrique d'une cellule photovoltaïque [19].

Ce modèle présente la cellule solaire autant que source de courant qui modélise la conversion d'un flux lumineux en énergie électrique. La résistance série r_s présente la résistance de contact et de connexion, une autre résistance parallèle (la résistance shunt r_p) représente le courant de fuite [19].

De ce fait, le modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension d'une cellule PV, peut être décrit en utilisant la loi de Kirchhoff aux nœuds via l'équation suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I \left[\exp\left(\frac{\beta}{n}(V + Ir_s)\right) - 1 \right] - \frac{(V + Ir_s)}{r_{sh}} \quad \text{Avec} \quad \beta = \frac{Q}{kT} \quad (\text{II.1})$$

Où :

I_{ph} : Le photo-courant, générer par les photons

I : Le courant de saturation en Ampère,

I_{pv} : Le courant délivré par la cellule PV

Q : charge d'électron (1.602×10^{-19} C)

K : constante de Boltzmann (1.381×10^{-23} J/k)

T : température effective de la cellule en Kelvin

r_s : Résistance série caractérisant les diverses résistances de contacts et de connexion, et de la résistivité des grilles collectrices en Ω

r_{sh} : Résistance shunt ou parallèle qui modélise les courants de fuites de la jonction, elle dépend de la façon dont celle-ci est réaliser en Ω .

III.2. Modélisation du module PV

La modélisation d'un panneau PV peut être réalisée à l'aide de diverses méthodes, allant des modèles analytiques simples aux modèles physiques plus complexes basés sur les équations fondamentales de la physique. Un module solaire est composé d'un groupe de cellules photovoltaïques élémentaires (ce qui offre à celui-ci les mêmes caractéristiques d'une cellule) connectées le plus souvent en série, qui lui-même sera connecter à d'autres modules pour créer un GPV avec les caractéristiques souhaiter [34].

Suivant le dimensionnement effectuer [44], un générateur solaire d'une puissance de 3300Wc permettra à notre système de fonctionner. Le choix s'est porté sur les modules 330Wc-Poly 72-cellules dont les paramètres électriques sont présents sur le **Tableau II.1** suivant :

Tableau II-1 : Caractéristiques du panneau photovoltaïque choisit

$P_{max}(W)$	$I_{SC}(A)$	$V_{OC}(V)$	$I_{MPP}(A)$	$V_{MPP}(V)$	N_T	N_s	N_p
330	9.02	45.8	8.45	39	10	2	5

Comme nous avons déjà mentionné lorsque les panneaux solaires sont assemblés en série la tension s'additionne avec un courant constant, en revanche s'ils sont montés en parallèle alors les courants s'additionnent et la tension reste la même.

Pour avoir les caractéristique souhaité on est mené parfois à mixer ces deux topologie comme dans notre cas où on dispose de 10 panneaux connecter par un câblage série parallèle ce qui nous permet d'avoir un GPV avec les caractéristiques montré sur le **Tableau II-2** dans les conditions de fonctionnement standards [44] :

Tableau II-2: Caractéristiques du générateur photovoltaïque utilisé

$P_{max}(w)$	$I_{SC}(A)$	$V_{OC}(V)$	$I_{MPP}(A)$	$V_{MPP}(V)$
3300	45 .1	91 .6	42.7	78

IV. Modélisation des convertisseurs

IV.1. Convertisseur Buck

Le convertisseur Buck est un type de convertisseur DC-DC abaisseur utilisé pour abaisser la tension d'entrée DC à une tension de sortie DC plus basse. Il est également connu sous le nom de convertisseur dévolteur [46].

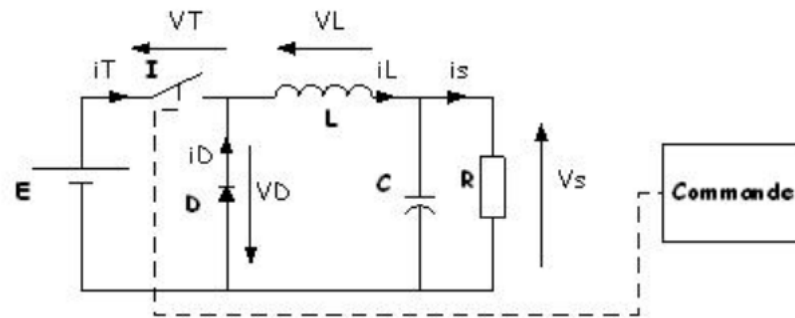


Figure II.3 : Schéma d'un hacheur série(Buck) [35].

Comme décrit sur la **Figure II.3**, le convertisseur série comporte en plus d'un interrupteur de puissance, un filtre LC dont l'intérêt est de limiter les ondulations résultantes du découpage sur la tension et le courant de sortie du convertisseur.

IV.1.1. Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement du convertisseur Buck repose sur la commutation périodique de l'interrupteur pour créer des transitions d'état qui permettent de stocker de l'énergie dans une inductance et de la libérer dans une charge. L'interrupteur est généralement contrôlé par une impulsion de commande, qui s'ouvre et se ferme rapidement en fonction d'un signal de modulation de largeur d'impulsion (PWM). Lorsque l'interrupteur est fermé (0 à DT), la diode est bloquée et le courant circule dans l'inductance et stocke de l'énergie. Lorsque l'interrupteur est ouvert (DT à T), la diode est passante et le courant va circuler à travers celle-ci vers la charge. Le rapport cyclique du signal PWM est ajusté pour réguler la tension de sortie souhaité [20].

Cependant il faut noter que ce dispositif respecte le principe de conservation d'énergie donc si $V_{in} > V_{out}$ alors $I_{in} < I_{out}$. [20].

Il existe donc deux circuit possibles qui résultent d'une position donnée de l'interrupteur, en appliquant les lois de Kirchhoff sur chacune on pourra extraire les équations

qui définissent celui-ci. Notons que la modélisation suivante est faite pour le mode de conduction continue [19].

- **De 0 à DT** : l'interrupteur est fermer et la diode est polarisée en inverse, comme montre la **Figure II.4**.

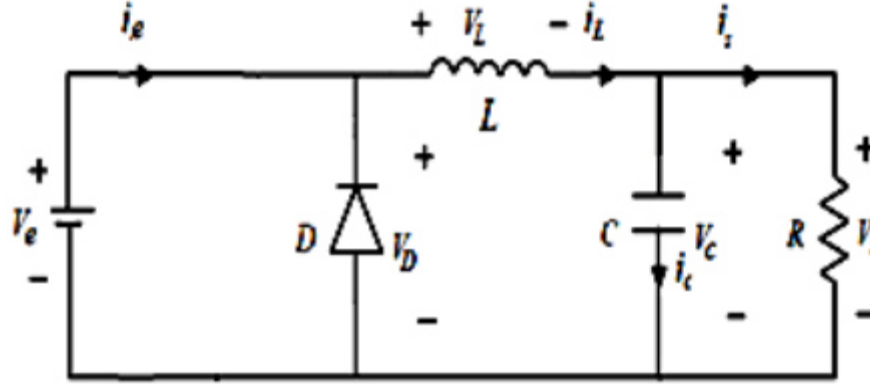


Figure II.4 : Circuit équivalent du convertisseur Buck pour interrupteur fermé [47].

En appliquant la loi des mailles sur ce circuit on obtient les équations suivantes [24] :

$$V_{in}(t) = V_L(t) + V_{out}(t) \quad \text{Avec } V_k(t) = 0v \quad (\text{II.2})$$

$$\text{Ce qui implique : } V_L = V_{in}(t) - V_{out}(t) \quad (\text{II.3})$$

$$\text{Donc : } L \frac{di_L(t)}{dt} = V_{in}(t) - V_{out}(t) \quad (\text{II.4})$$

$$\text{De ce fait : } i_L(t) = \frac{V_{in} - V_{out}}{L} t + I_{Lmin} \quad (\text{II.5})$$

On sait que pour $t=0$ on aura un courant I_L minimal et pour $t = DT$ on aura un courant I_L maximal donc on peut déduire que :

$$i_L(DT) = I_{Lmax} = \frac{V_{in} - V_{out}}{L} DT + I_{Lmin} \quad (\text{II.6})$$

Alors l'ondulation Δi_L crête à crête du courant peut être déterminée par la formule suivante :

$$\Delta i_L = I_{Lmax} - I_{Lmin} = \frac{V_{in} - V_{out}}{L} DT \quad \text{Avec } T = \frac{1}{f_s} \quad (\text{II.7})$$

L'ondulation du courant dans le récepteur est directement proportionnelle à la fréquence de hachage utilisée dans la modulation de largeur d'impulsion (PWM). Ainsi, plus la fréquence de hachage est élevée, plus l'ondulation du courant sera faible. Cela signifie qu'une augmentation significative de la fréquence de hachage nécessiterait l'utilisation de composants électroniques à commutation rapide, tels que des MOSFETs, qui sont capables de commuter rapidement pour maintenir une forme d'onde de tension propre à des fréquences plus élevées [48].

- **De DT à T** : l'interrupteur est ouvert et la diode d passante comme montre la **Figure II.5**.

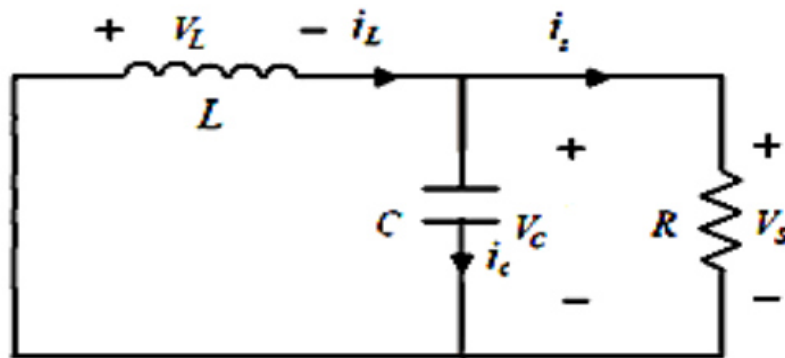


Figure II.5 : Circuit équivalent du convertisseur Buck pour interrupteur ouvert [47].

En appliquant la loi des mailles sur ce circuit on obtient les équations suivantes [46] :

$$V_L(t) = -V_{out}(t) \quad \text{Avec } V_{out}(t) = V_c(t) \text{ et } V_d(t) = V_c(t) \quad (\text{II.8})$$

$$\text{Donc : } -L \frac{di_L(t)}{dt} = V_{out}(t) \quad (\text{II.9})$$

$$\text{Ce qui implique : } i_L(t) = \frac{V_{out}}{L} t + I_{Lmax} \quad (\text{II.10})$$

On sait que pour $t=DT$ on aura un courant I_L maximal et pour $t=T$ on aura un courant I_L minimal donc on peut déduire que :

$$i_L(T) = I_{Lmin} = \frac{-V_{out}}{L} (T - DT) + I_{Lmax} \quad (\text{II.11})$$

Alors l'ondulation Δi_L crête à crête du courant peut être déterminée par la formule suivante :

$$\Delta i_L = I_{Lmax} - I_{Lmin} = \frac{V_{out}}{L} (T - DT) \quad \text{Avec } T = \frac{1}{f_s} \quad (\text{II.12})$$

En régime permanent, l'énergie stockée dans chaque composant du convertisseur Buck reste constante au début et à la fin de chaque cycle de commutation. Par conséquent, le courant I_L qui circule dans l'inductance reste également constant au début et à la fin de chaque cycle de commutation. Cela signifie que le courant dans l'inductance ne change pas de façon significative pendant une période de commutation et reste pratiquement stable [35], ce qui nous permet à partir des deux équations (II.7) et (II.12) d'avoir :

$$\frac{V_{out}}{L} (T - DT) = \frac{V_{in} - V_{out}}{L} DT \rightarrow \frac{V_{out}}{V_{in}} = D \quad (\text{II.13})$$

Ce qui implique que :

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

Le rapport cyclique D détermine linéairement la variation de la tension de sortie. Ainsi, la tension de sortie V_{in} est toujours inférieure à la tension d'entrée car le rapport cyclique est compris entre 0 et 1. Dans des conditions idéales où il n'y a pas de perte de puissance, la puissance moyenne à l'entrée et à la sortie du circuit est égale si on considère l'inductance, la diode et le commutateur comme étant idéaux [35].

IV.1.2. Dimensionnement et choix des composants

Cette section présente les critères de choix de chacun des composants principaux du Buck-Boost, pour répondre à un cahier de charge et une application bien précise. En effet un surdimensionnement de ceux-ci va accroître le poids et le prix des circuits.

IV.1.2.1. Ondulation du courant et choix de l'inductance

Il est très important que le dimensionnement de l'inductance L respecte le courant admissible par le transistor MOSFET et celui de la charge. Si l'on souhaite limiter l'ondulation maximale du courant Δi_L pour une valeur donnée, il est important de bien choisir la fréquence de commutation f_s . En effet, plus la fréquence de commutation est élevée, plus le noyau de l'inductance peut être réduit, ce qui est approuvé par la formule suivante (II.7) qui nous permet de calculer la valeur de L [48] :

$$\Delta i_L = I_{Lmax} - I_{Lmin} = \frac{V_{out}}{L} (T - DT) \quad \text{Avec } T = \frac{1}{f_s} \quad (\text{II.14})$$

$$\Delta i_L = \frac{V_{out}}{Lf_s} (1 - D) \quad (\text{II.15})$$

$$L = \frac{V_{out}}{f_s \Delta i_L} (1 - D) \quad \text{Avec } V_{out} = DV_{in} \quad (\text{II.16})$$

Ce qui implique :

$$L = \frac{V_{in}}{f_s \Delta i_L} (1 - D)D \quad (\text{II.17})$$

Et pour un mode de conduction continue, on suppose que :

$$\Delta i_L = 2I_{out} \quad \text{Avec : } I_{out} = \frac{V_{out}}{R} \quad (\text{II.18})$$

On combinat l'équation (II.16) et (II.18) on obtient une deuxième équation permettant de calculer la valeur de l'inductance L et qui est dépendante de la valeur de la charge :

$$L = \frac{R(1-D)}{2f_s} \quad (\text{II.19})$$

En générale une bonne estimation du courant d'ondulation de l'inductance maximale tolérée est de 20 % à 40 % du courant de sortie [49]. Notons qu'on peut calculer la valeur de l'inductance maximale pour un rapport cyclique de 50%.

IV.1.2.2. Ondulation de la tension et choix du condensateur

Afin de maintenir la tension de sortie V_{out} et le courant I_{out} constants, même pendant l'ouverture de l'interrupteur, les topologies de convertisseurs incluent généralement un condensateur C. Les composants du convertisseur sont dimensionnés de manière à minimiser les ondulations des tensions et courants de sortie lors de la transition de l'interrupteur de la fermeture à l'ouverture et inversement. Pour estimer l'ondulation de la tension de sortie, on suppose que le courant traversant le condensateur est égal à l'ondulation du courant dans l'inductance. En d'autres termes, on suppose que l'ondulation du courant traversant la charge R est nulle [35].

Il est possible d'observer que pour chaque demi-période de commutation, le condensateur stocke ou libère une charge ΔQ , ce qui entraîne une variation de la tension à ses bornes comme montre la **Figure II.6**, cette variation est donnée par la formule suivante :

$$\Delta V_c = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{V_{out}}{8LCf^2}(1 - D)D \quad (II.20)$$

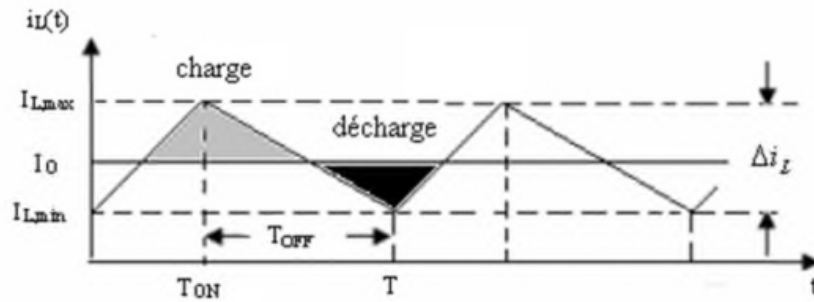


Figure II.6 : Charge et décharge du condensateur de sorti [48].

Si l'ondulation de courant est connue alors on aura la formule suivante :

$$C = \frac{\Delta i_L}{8L\Delta V_{out}f^2} \quad (II.21)$$

Pour un rapport cyclique de 50%, on aura une ondulation maximal et celle-ci nous permettras de déterminer la valeur de condensateur qui permette d'avoir une ondulation inférieur à cette valeur :

$$C \geq \frac{V_{in}}{32.L.\Delta V_{Cmax}.f^2} \quad (II.22)$$

IV.2. Convertisseur Buck-Boost

Le convertisseur Buck-Boost (appelé aussi inverter chopper) est un type de convertisseur DC-DC qui permet de réguler la tension de sortie, supérieure ou inférieure à la tension d'entrée, selon les applications. Il combine les propriétés des convertisseurs Buck et Boost, et peut être utilisé comme un transformateur idéal pour produire n'importe quelle tension de sortie à partir de n'importe quelle tension d'entrée mais de polarité inverse, ce qui est dû à la diode qui est placé dans le sens opposé du flux. Le schéma de base de ce convertisseur est illustré dans la **Figure II.7** [36].

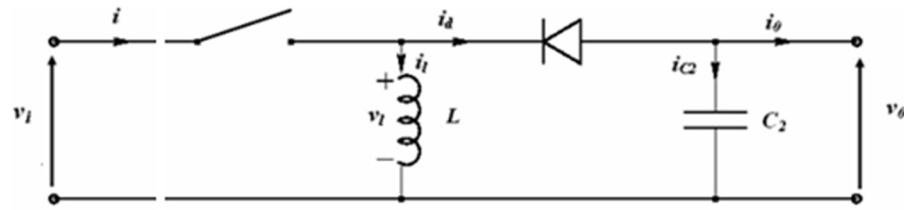


Figure II.7 : Le schéma de base du convertisseur Buck-Boost [50].

IV.2.1. Principe de fonctionnement

Tous comme pour le convertisseur Buck, Il existe donc deux configurations possibles. En appliquant les lois de Kirchhoff sur chacune des configurations on pourra extraire les équations définissant le fonctionnement de celui-ci. Notons que la modélisation suivante est faite pour le mode de conduction continue [48].

- **De 0 à DT :** l'interrupteur est fermer et la diode est polarisée en inverse, comme illustré par la **Figure II.8**.

En fermant l'interrupteur, celui-ci offre une résistance nulle au flux de courant, ce qui conduit tout le courant à passer à travers l'inductance avant de retourner à la source d'entrée DC. Pendant ce temps, l'inductance stocke de l'énergie électrique. Lorsque la diode est bloquée, la polarité de l'inducteur s'inverse, permettant au courant de circuler à travers la charge, puis la diode avant de revenir vers la source (inductance). Ainsi, la direction du courant à travers l'inducteur reste inchangée [20].

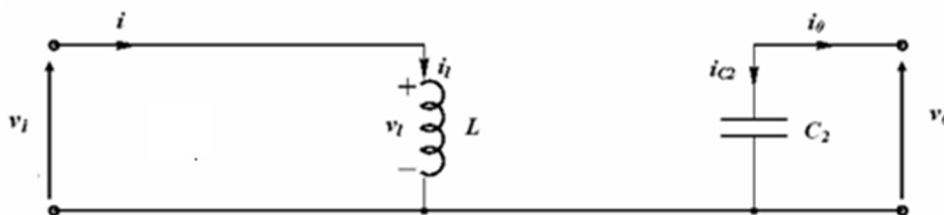


Figure II.8 : Circuit équivalent du convertisseur Buck-Boost pour interrupteur fermé [50].

En appliquant la loi des mailles sur ce circuit on obtient les équations suivantes [46] :

$$V_{in}(t) = V_L(t) \text{ Avec } V_k(t) = 0v \quad (II.23)$$

$$\text{Donc : } L \frac{di_L(t)}{dt} = V_{in}(t) \quad (\text{II.24})$$

$$\text{De ce fait : } i_L(t) = \frac{V_{in}}{L} t + I_{Lmin} \quad (\text{II.25})$$

Pour $t=0$ on aura un courant I_L minimal et pour $t =DT$ on aura un courant I_L maximal dont on peut déduire que :

$$i_L(DT) = I_{Lmax} = \frac{V_{in}}{L} DT + I_{Lmin} \quad (\text{II.26})$$

D'où l'ondulation Δi_L crête à crête du courant peut être déterminée par la formule suivante :

$$\Delta i_L = I_{Lmax} - I_{Lmin} = \frac{V_{in}}{L} DT \quad \text{Avec } T = \frac{1}{f_s} \quad (\text{II.27})$$

- **De DT à T** : l'interrupteur est ouvert et la diode **d** passante, illustré dans la **Figure II.9**.

Pendant la phase de décroissance, l'interrupteur est ouvert, l'énergie stocké dans l'inductance L est restituée pour alimenter en continue la charge.

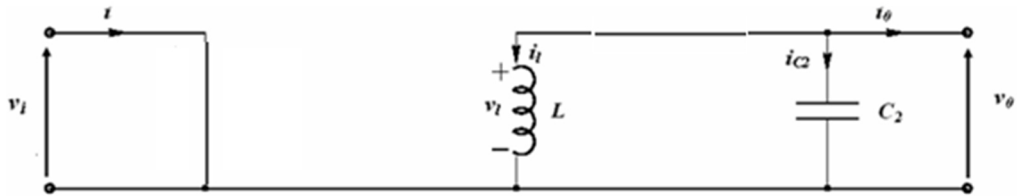


Figure II.9 : Circuit équivalent du convertisseur Buck-Boost pour interrupteur ouvert [50].

En appliquant la loi des mailles sur le circuit de la **Figure II.9** on obtient les équations suivantes [46] :

$$V_L(t) = -V_{out}(t) \quad \text{Avec } V_{out}(t) = V_c(t) \text{ et } V_d(t) = V_c(t) \quad (\text{II.28})$$

$$\text{Donc : } -L \frac{di_L(t)}{dt} = V_{out}(t) \quad (\text{II.29})$$

$$\text{Ce qui implique : } i_L(t) = \frac{V_{out}}{L} t + I_{Lmax} \quad (\text{II.30})$$

Pour $t=DT$ on aura un courant I_L maximal et pour $t=T$ on aura un courant I_L minimal dont on peut réécrire l'équation du courant-dans l'inductance :

$$i_L(T) = I_{Lmin} = \frac{-V_{out}}{L} (T - DT) + I_{Lmax} \quad (II.31)$$

L'ondulation Δi_L crête à crête du courant peut être déterminée par la formule suivante :

$$\Delta i_L = I_{Lmax} - I_{Lmin} = \frac{V_{out}}{L} (T - DT) \quad \text{Avec } T = \frac{1}{f_s} \quad (II.32)$$

A partir de deux équations (V.25) et (V.30) on aura :

$$\frac{V_{in}}{L} DT = \frac{-V_{out}}{L} (1 - D)T \rightarrow \frac{-V_{out}}{V_{in} - V_{out}} = D \quad (II.33)$$

Sachant que la tension de sortie est inversée on pourra écrire la formule (II.33) ainsi :

$$\frac{V_{out}}{V_{in} + V_{out}} = D \quad (II.34)$$

Ce qui implique que :

$$V_{out} = \frac{D}{1-D} V_{in} \quad (II.35)$$

La tension de sortie du convertisseur Buck-Boost est déterminée en fonction de la tension d'entrée et le rapport cyclique D. Ce convertisseur peut agir comme un transformateur abaisseur pour un rapport cyclique inférieur à 0.5, ou élévateur pour un rapport cyclique supérieur à 0.5. Cependant, étant donné que la tension de sortie est toujours de signe opposé à celle d'entrée, il est souvent appelé convertisseur inverseur. La tension de sortie idéale est censée être indépendante de la charge, mais en pratique, la régulation doit compenser les variations de tension d'entrée et les imperfections des composants réels [40].

IV.2.2. Dimensionnement et choix des composants

Le choix des composants pour un convertisseur Buck-Boost dépend de plusieurs facteurs, notamment la tension d'entrée, la tension de sortie, le courant de sortie, la fréquence de commutation et l'ondulation de courant et de tension admissible.

IV.2.2.1. Ondulation du courant et choix de l'inductance

Le choix de l'inductance pour un convertisseur Buck-Boost doit être soigneusement considéré pour optimiser l'efficacité, la stabilité et les performances globales du circuit, de ce fait on peut le faire on utilisant les équations précédemment définit [51] :

$$\Delta i_L = I_{Lmax} - I_{Lmin} = \frac{V_{out}}{L} (T - DT) \quad \text{Avec } T = \frac{1}{f_s} \quad (\text{II.36})$$

$$\Delta i_L = \frac{V_{out}}{f_s L} (1 - D) \quad (\text{II.37})$$

$$L = \frac{V_{out}}{f_s \Delta i_L} (1 - D) \quad \text{Avec } V_{out} = \frac{D}{1-D} V_{in} \quad (\text{II.38})$$

Ce qui implique :

$$L = \frac{V_{in}}{f_s \Delta i_L} D \quad (\text{II.39})$$

IV.2.2.2. Ondulation de tension et choix du condensateur

Pour choisir le condensateur approprié, il est généralement recommandé de commencer par utiliser une valeur standard pour le condensateur et de vérifier si elle satisfait les spécifications du convertisseur. Si l'ondulation de tension est trop élevée, un condensateur plus grand peut être utilisé pour réduire l'ondulation de tension [51].

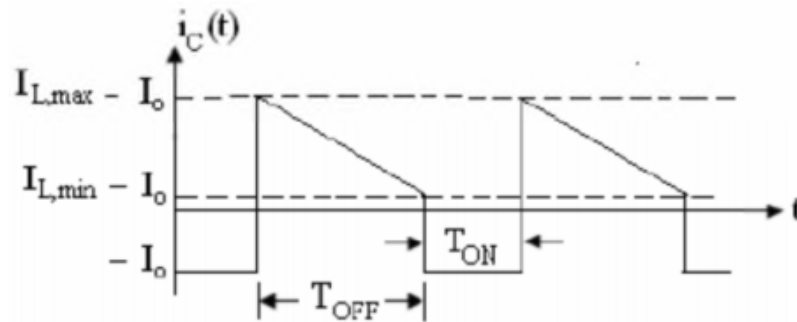


Figure II.10 : Forme de courant à travers le condensateur [48].

En observant la forme d'onde de courant présentée dans la **Figure II.10**, il est possible de déterminer la variation de la tension aux bornes du condensateur :

$$\Delta Q = \frac{-V_{out}}{R} DT \quad (\text{II.40})$$

$$|\Delta V_{out}| = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{V_{out}}{RC} DT \quad (II.41)$$

$$C = \frac{V_{out}}{R\Delta V_{out}f_s} D \quad \text{Avec} \quad V_{out} = I_{out}R \quad (II.42)$$

$$C = \frac{I_{out}}{\Delta V_{out}f_s} D \quad (II.43)$$

En s'appuyant sur les équations antérieurement exposées, nous avons effectué un dimensionnement, comme illustré dans le **Tableau II.3** ci-dessous. Il convient de souligner que notre approche diffère de la méthode conventionnelle qui consiste à fixer une fréquence de commutation (f_s) et à rechercher ensuite le matériel approprié. Au contraire, nous avons calculé cette fréquence adéquate en fonction du matériel dont nous disposons préalablement.

Tableau II.3 : Dimensionnement des convertisseurs DC-DC utilisé dans le système.

Convertisseur	r	D	f_s	L_{min}	C_{min}	$\Delta i_L(A)$	$\Delta v_{out}(V)$
Buck	$\frac{V_{out}}{V_{in}}$	$\frac{V_{out}}{V_{in}}$	$\frac{R(1-D)}{2L}$	$\frac{R(1-D)}{2f_s}$	$\frac{\Delta i_L}{8L\Delta V_{out}f^2}$	$\frac{V_{out}}{Lf_s}(1-D)$	$\frac{V_{out}}{8LCf^2}(1-D)D$
	0.61	0.61	6KHz	300 μ H	10000 μ F	<15%	<1%
Buck-Boost	$\frac{V_{out}}{V_{in}}$	$\frac{V_{out}}{V_{in} + V_{out}}$	$\frac{R(1-D^2)}{2L}$	$\frac{V_{in}}{f_s\Delta i_L} D$	$\frac{I_{out}}{\Delta V_{out}f_s} D$	$\frac{V_{out}}{f_s L}(1-D)$	$\frac{V_{out}}{RC} DT$
	0.1	0.09	12KHz	300 μ H	10000 μ F	<15%	<1%

V. Modélisation et choix de la batterie

L'apport énergétique solaire est périodique du fait de son alternance entre jour et nuit mais aussi aléatoire car il dépend des conditions météorologiques. Cette variabilité nous exige l'utilisation d'un système de stockage d'énergie tel que les piles à combustible, les super-condensateurs et les batteries qui sont habituellement utilisés dans les systèmes photovoltaïques et que nous allons utiliser aussi dans le système [52].

L'une des caractéristiques électriques généralement employé pour caractériser une batterie est la Capacité. La capacité d'une batterie représente la quantité de courant qu'elle peut fournir au fils de temps. Elle est exprimée en Ampère heure ou en wattheure.

Pour dimensionné le parc de batterie a utilisé il faut prendre en compte la tension du système ainsi que les spécifications de la charge. Suivant l'étude effectuer par CRD/SONATRACH les spécifications de la charge sont comme suit : charge de 480W (48v, 10A) ; tension du système 48v ; temps de fonctionnement de 24h ; consommation journalière de 11520 Wh/j ainsi qu'une autonomie de 2jours. Ces paramètres nous permettent alors de calculer la capacité minimale du parc de batterie donnée par la formule suivante [44] :

$$C_{(Ah)} = \frac{E_c \cdot N_j}{\eta_b \cdot D \cdot V_b} \left\{ \begin{array}{l} E_c : \text{Consommation journalière (Wh.J)} \\ \eta_b : \text{Rendement de la batterie (\%)} \\ D : \text{Prfondeur de décharge maximale de la batterie (\%)} \\ V_b : \text{Tension de fonctionnement des batterie (Volt)} \end{array} \right.$$

Ainsi la capacité théorique du parc de batterie recommandé pour assurer une autonomie de deux jours est estimée à 640Ah, et c'est cette valeur qu'on utilisera lors de la simulation du système. En pratique le choix du DCRD était porté sur une batterie de type GEL. Notons qu'on simulation nous avons utilisé une batterie de type Lithium-Ion disponible sur l'environnement Matlab/Simulink.

VI. Modélisation de la charge

Le dimensionnement et modélisation exacte de la protection cathodique relève de l'expertise d'un professionnel spécialisé dans ce domaine. Toutefois, il est opportun d'énoncer quelques principes fondamentaux à titre indicatif qui nous permettrons d'effectuer la simulation.

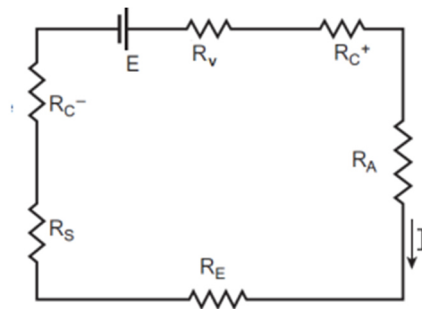


Figure II.11 : Circuit simplifié équivalent d'une PC par courant imposé [53].

Le dispositif de protection cathodique par courant imposé peut être représenté par la **Figure II.11** Conformément au circuit présenté, il est aisé d'observer que la mise en place du circuit dans son ensemble implique la prise en compte de six résistances disposées en série [53] :

- R_C^+ et R_C^- : correspondent à la résistance des câbles positifs et négatifs, elle dépend de la longueur et la surface de section transversale du conducteur, cette résistance peut être ignoré théoriquement.
- R_A : c'est la résistance anode- électrolyte, elle dépend de la forme, le nombre et l'espacement des anodes utilisées ainsi que de la résistivité de l'électrolyte.

$$R_A = \frac{0,00521\rho}{L} \left[\ln\left(\frac{8L}{D}\right) - 1 \right] \quad (II.44)$$

Où ρ est la résistivité de l'électrolyte ($\Omega.cm$), et L et D sont la longueur et le diamètre de l'anode (cm).

- R_S : représente la résistance de la structure à protéger (matériau) et est pratiquement négligeable.
- R_e : c'est la résistance de l'électrolyte ; chaque solution présente une conductivité, une résistivité et une résistance.
- R_v : résistance variable placée pour contrôler la valeur du courant appliqué, et ce, suivant la loi d'Ohm.

Pour le cas de cette étude, nous allons représenter uniquement la charge et qui est estimé à 3.7Ω (estimation faite par le DC R&D) soit : 3 résistances (anode, sol, structure) et le potentiel de polarisation du pipeline comme montre le **Tableau II.4** :

Tableau II.4 : Paramètres du circuit équivalent à la charge.

Polarisation P	r_{Anode}	r_{sol}	$r_{structure}$
0.85	1.5 Ω	1.5 Ω	0.1 Ω

On estime qu'une canalisation en acier bénéficie d'une protection cathodique optimale lorsque son potentiel, mesuré en tout point par rapport à l'électrode de référence Cu/CuSO₄, demeure inférieur au seuil de **-850 millivolts** (correspondant au domaine d'immunité de l'acier) ce qui justifie l'utilisation de la polarisation de 0.85v [18]. Autrement dit en cas où le système est en défaillance, les ouvrage aurons au moins ce potentiel.

VII. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons procédé à une modélisation holistique du système étudié dans son ensemble, accompagné par le dimensionnement individuelle de chaque bloc qu'il comporte soit : le GPV, la batterie, les convertisseurs DC-DC (Buck-Boost et Buck) ainsi que la charge (structure métallique). Dans le chapitre suivant, notre attention sera portée à la fois sur la simulation intégrale du système et à l'analyse des résultats obtenus, ainsi qu'à la validation expérimentale.

Chapitre III : Simulation et validation expérimentale

I. Introduction

Dans ce chapitre, notre attention est portée à la fois sur la simulation intégrale du système de PC, et à l'analyse des résultats obtenus, ainsi qu'à la validation expérimentale. La partie expérimentale se limite à la réalisation d'un convertisseur Buck_Boost et sa commande PWM à travers un asservissement en boucle ouverte ensuite en boucle fermée.

Dans le cadre de la mise en œuvre de la partie expérimentale, nous avons bénéficié d'un encadrement au sein du laboratoire recherche et développement de la SONATRACH, Direction Centrale Recherche et Développement (DC R&D), où nous avons effectué la partie primaire de l'étude et du développement du projet. Pour la suite, nous avons complétés notre travail en collaboration avec le laboratoire LATAGE de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou afin de mettre en place ces prérequis pour la commande du convertisseur Buck-Boost.

II. Simulation du système

La simulation constitue un outil précieux pour faciliter la transition entre la conception théorique et la concrétisation pratique d'un système. Cette approche offre l'avantage de permettre l'exploration d'un vaste éventail d'étude, nous permettons ainsi de prévoir et d'appliquer différentes solutions et, finalement, de sélectionner la plus optimale sans le recours au moindre coût.

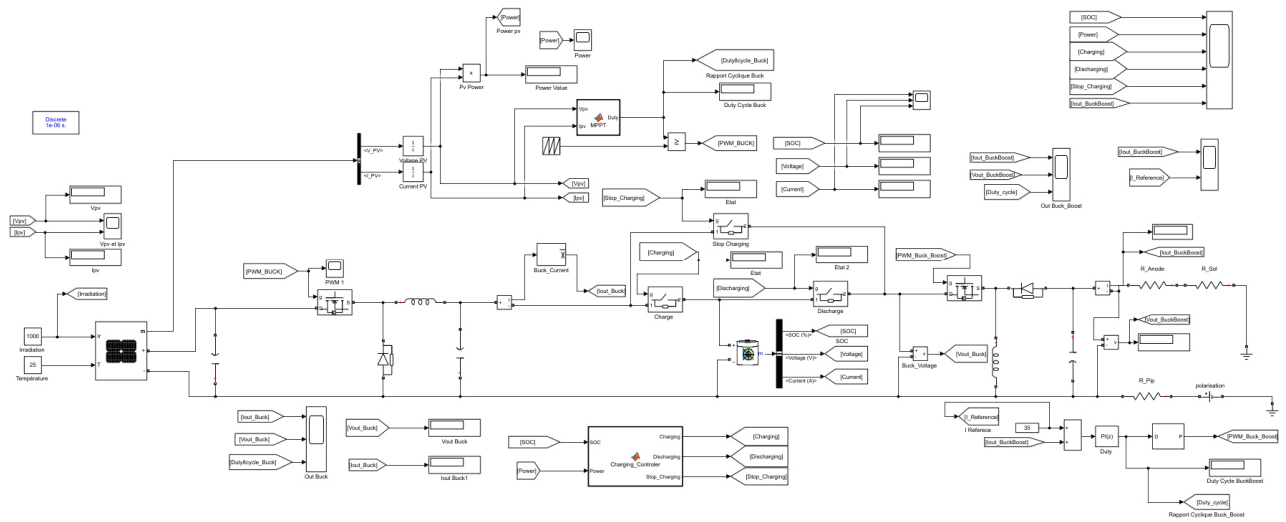


Figure III.1 : Schéma bloc Simulink du système de PC globale

Afin d'étudier le comportement du système de PC globalement, un modèle de simulation est conçu sous l'environnement Simulink/Matlab. Le schéma bloc de simulation est illustré par la **Figure III.1**.

Ce schéma bloc simulink est constitué de 3 parties principales à savoir le système d'alimentation autonome avec une commande de gestion de charge et de décharge de la batterie, le convertisseur de protection cathodique et le modèle de la structure métallique (la charge).

II.1. Système d'alimentation autonome

Ce système est constitué principalement de panneaux photovoltaïques comme une source d'alimentation de l'ensemble du système PC, d'un étage d'adaptation DC-DC dévolteur équipé d'une commande à MPPT (P&O) afin d'extraire le maximum de puissance du GPV vers la charge, en alimentant la PC et le reste de la puissance sera stocker dans les batteries accumulateur.

II.1.1. Simulation du GPV

La **Figure III.2**, représente les différentes caractéristiques (Courant-tension), (puissance-tension) du panneau photovoltaïque dans les conditions standard de fonctionnement en température et en irradiation (25°C , $1000\text{W}/\text{m}^2$) :

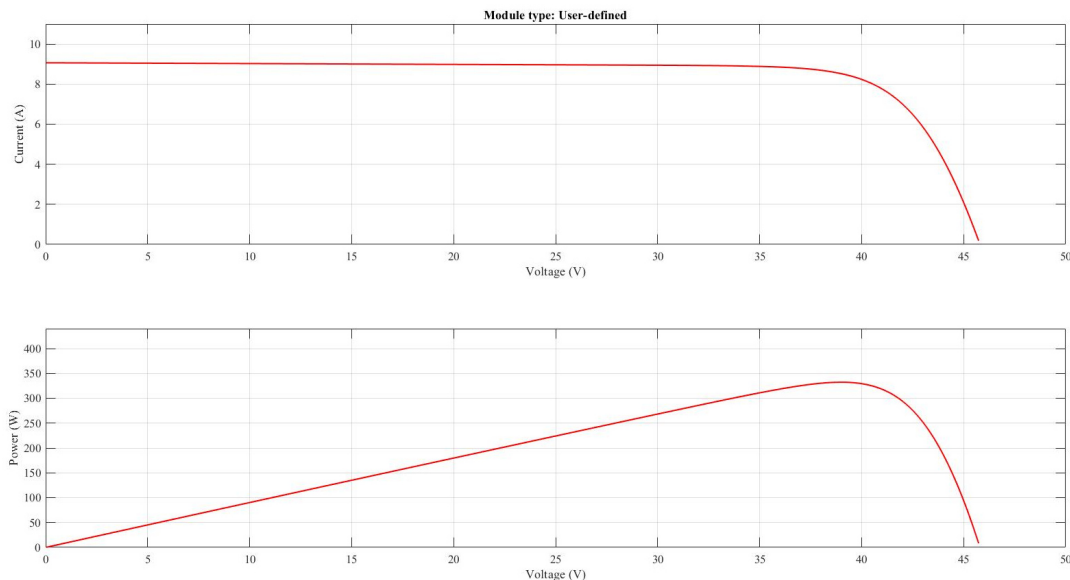


Figure III.2: les caractéristiques I(V) et P(V) du module choisit.

Afin d'étudier préalablement le comportement du GPV, constituer consécutivement de 2 modules en série et 5 en parallèles tel que mentionné dans le chapitre II ; des variations ont

été appliqués sur les grandeurs d'entrées du générateur PV à savoir la température et l'éclairement.

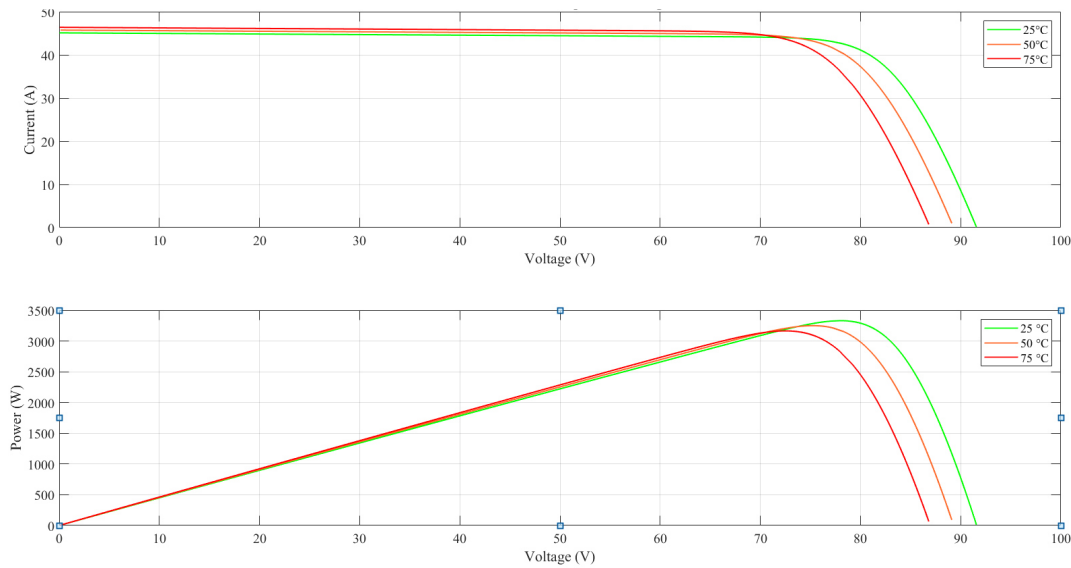


Figure III.3: Caractéristique du GPV pour différentes valeurs de températures.

Comme le montre la **Figure III.3**, on fixe l'éclairement dans un premier temps à 1000W/m^2 et on fait varier la température entre « 20, 50 et 70°C » afin de voir l'effet de la température sur les caractéristiques de la puissance et de la tension du GPV. La caractéristique $I(V)$ montre que le courant est faiblement dépendant de la température par rapport à la tension. La température fait diminuer la tension du circuit ouvert du générateur, et la caractéristiques $P(V)$ montre que l'augmentation de la puissance est dans le sens inverse de la température.

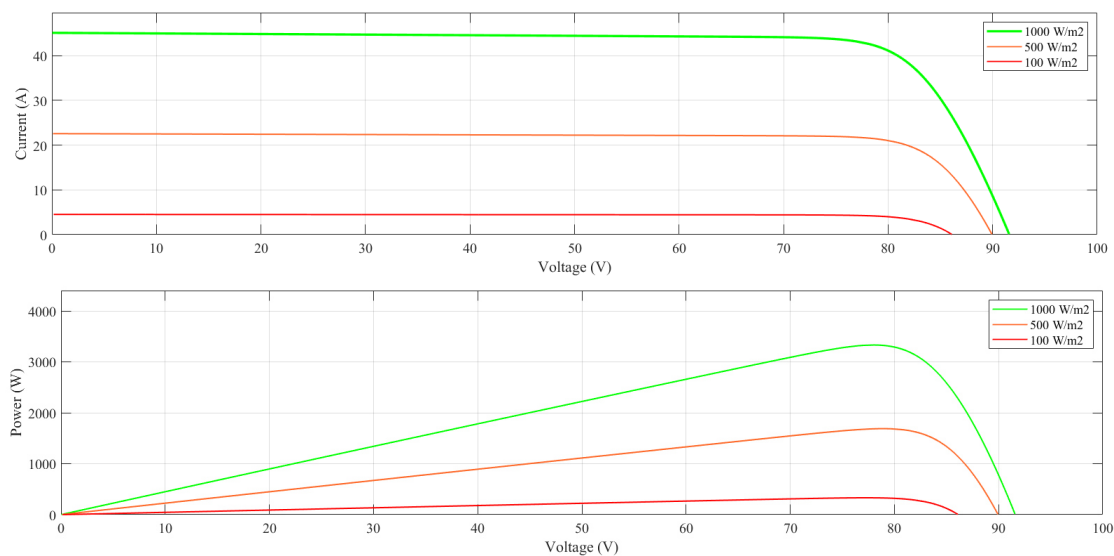


Figure III.4 : Caractéristique du GPV pour différentes valeurs d'éclairement.

Afin de voir l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques du GPV, nous avons fixé la température à 25°C et nous avons procédé à la variation de l'éclairement entre « 100, 500 et 1000W/m² » comme illustré par la **Figure III.4**. On remarque que plus l'éclairement augmente, plus le GPV génère plus de puissance et que la tension est faiblement dépendant de la température par rapport au courant.

Les résultats de la simulation permettent de récapituler les caractéristiques électriques du GPV pour les différentes valeurs d'irradiation et de températures, comme présenté dans le **Tableau III.1** ci-dessous :

Tableau III.1: Grandeurs électriques du GPV pour différentes valeurs d'irradiation et de températures.

Température	P(w)	I(A)	V(v)	Irradiation	P(w)	I(A)	V(v)
25°	3330.6	42.7	78	1000W/m ²	3330.7	42.7	78
50°	3039.71	42.8	70.91	500W/m ²	1640	21.35	76.8
75°	2748.64	43.1	63.7	100W/m ²	309.2	4.25	72.6

II.1.2. Chargeur de batterie à commande MPPT

Afin de vérifier la robustesse de la commande à MPPT, nous avons implémenté l'algorithme (P&O) dans la partie adaptateur d'impédance du schéma block Simulink du système de PC. Les variations de l'éclairement et de la température du générateur ont été réalisés par des blocs « Signal Builder » sous Simulink comme illustré par les **Figures III.5** et **III.8**.

Plusieurs simulations ont été réalisées, ainsi que des caractéristiques électriques sont visualisées comme illustrés par les différentes Figures **III.6**, **III.7**, **III.9** et **III.10**. Ces résultats de simulation, démontrent le fonctionnement du système d'alimentation autonome sous l'effet de la perturbation que nous pouvons considérer tels que l'éclairement et la température.

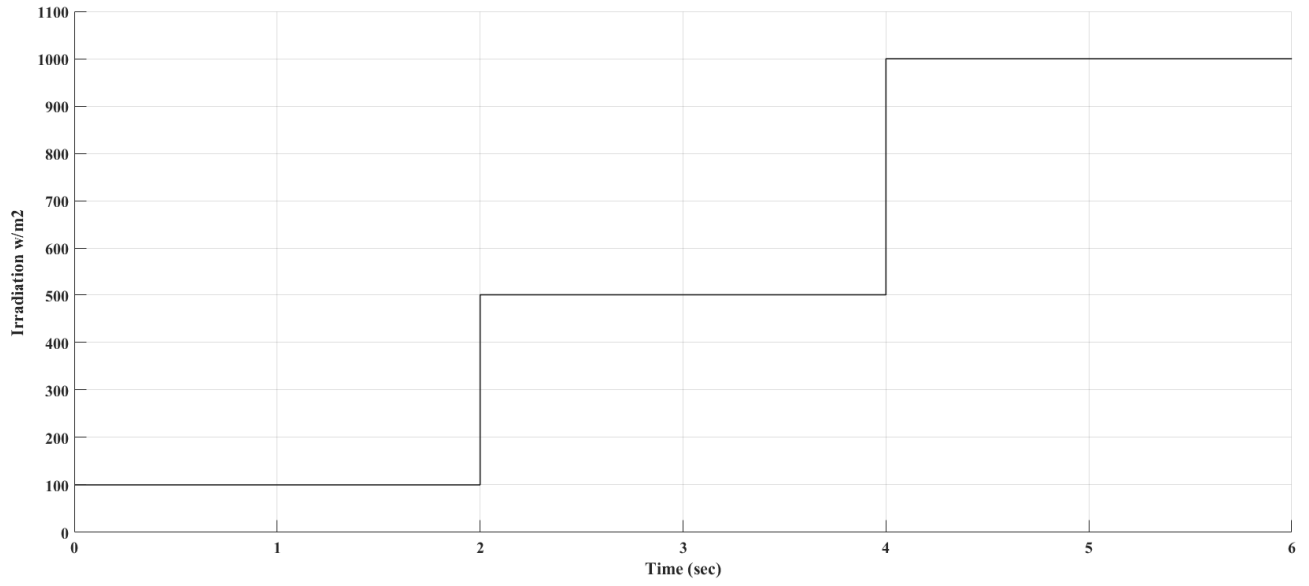


Figure III.5 : Le signal généré par le block Signal Builder pour varier l'irradiation.

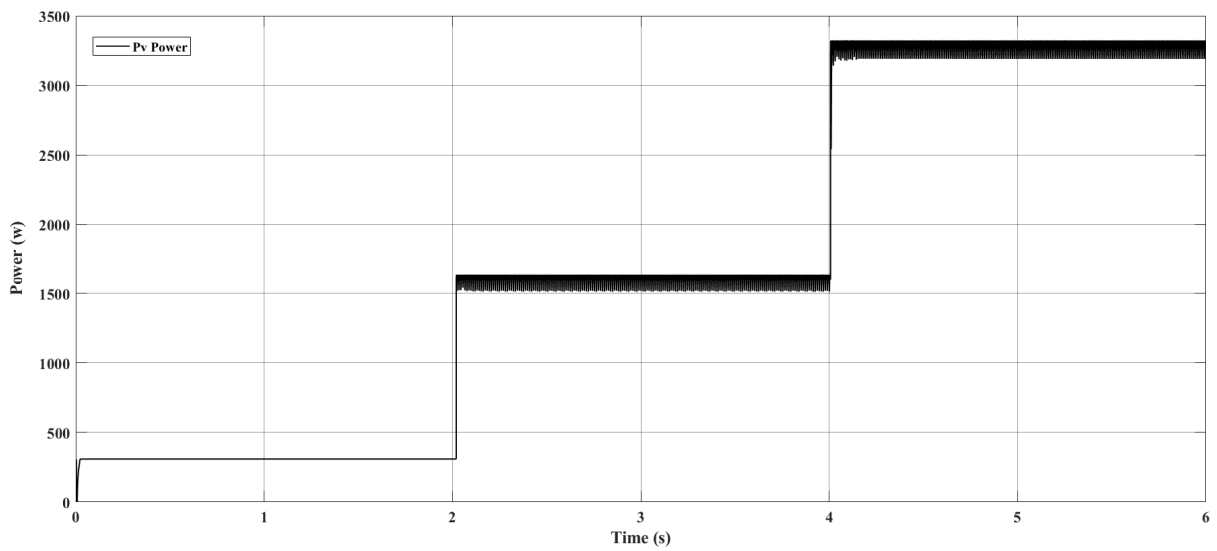


Figure III.6 : Puissance d livr e par le GPV par rapport   l'irradiation appliqu e

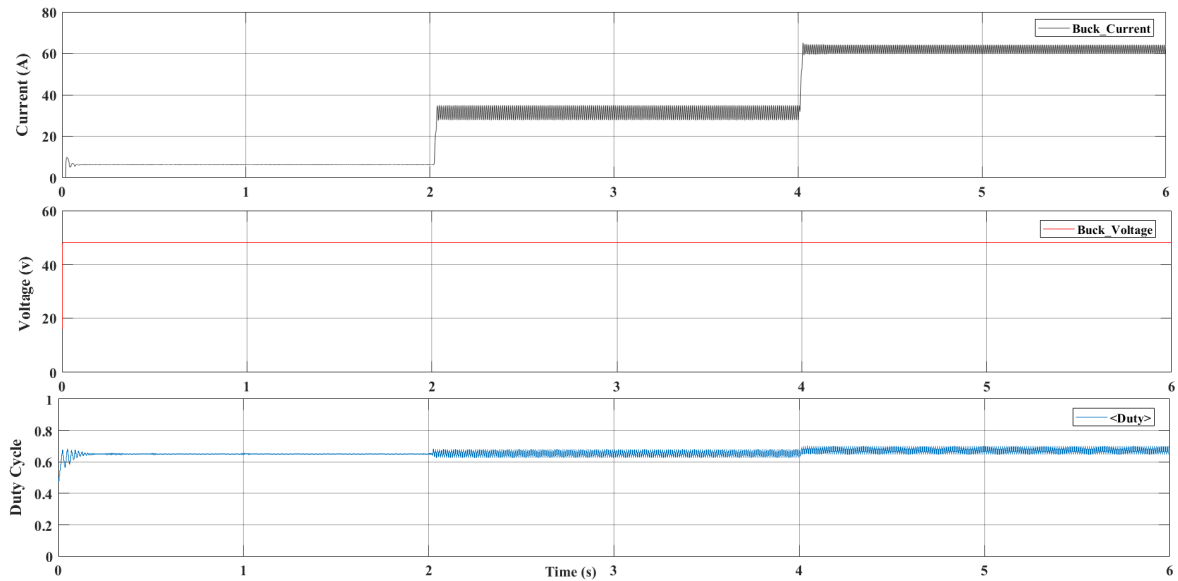


Figure III.7 : Effet de l'irradiation sur le courant et la tension en sortie du convertisseur DC-DC Buck par rapport au contrôle de l'MPPT.

La **Figure III.6** montre que la puissance délivrée par le panneau augmente avec l'augmentation de l'irradiation suivant le point de puissance maximale correspondant. De même, le courant de l'étage d'adaptation Buck suit cette variation dans le même sens, tout en délivrant une tension continue de 48v avec un rapport cyclique aux alentours de la même valeur (60%) du fait que l'éclairement a un effet important sur le courant délivré par le GPV vers la charge comme illustré sur la **Figure III.7**. Ces résultats approuvent le fonctionnement de la commande MPPT.

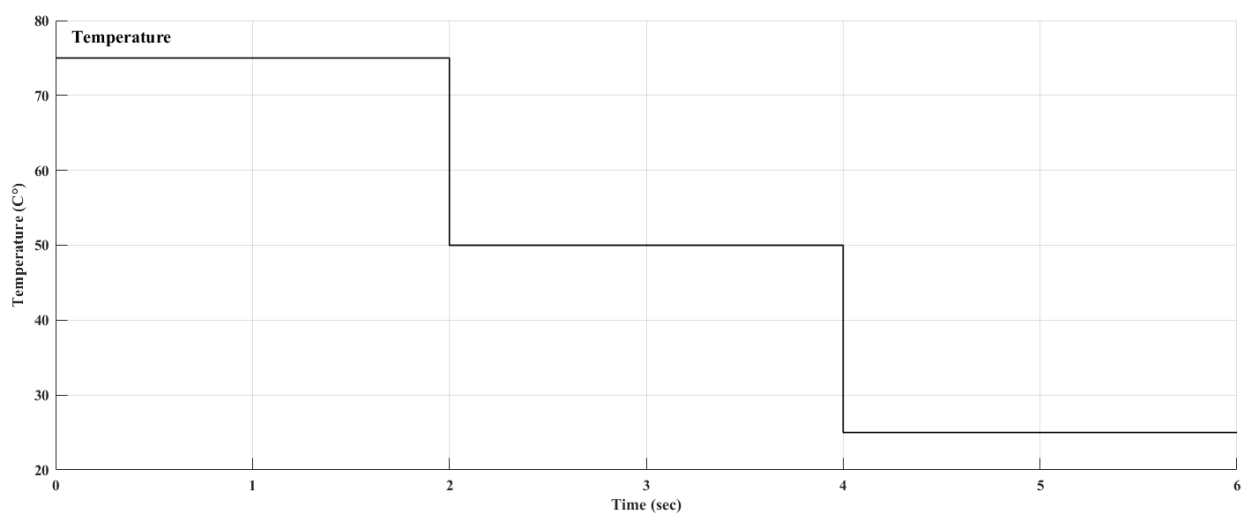


Figure III.8 : Le signal appliqué au GPV pour varier la température.

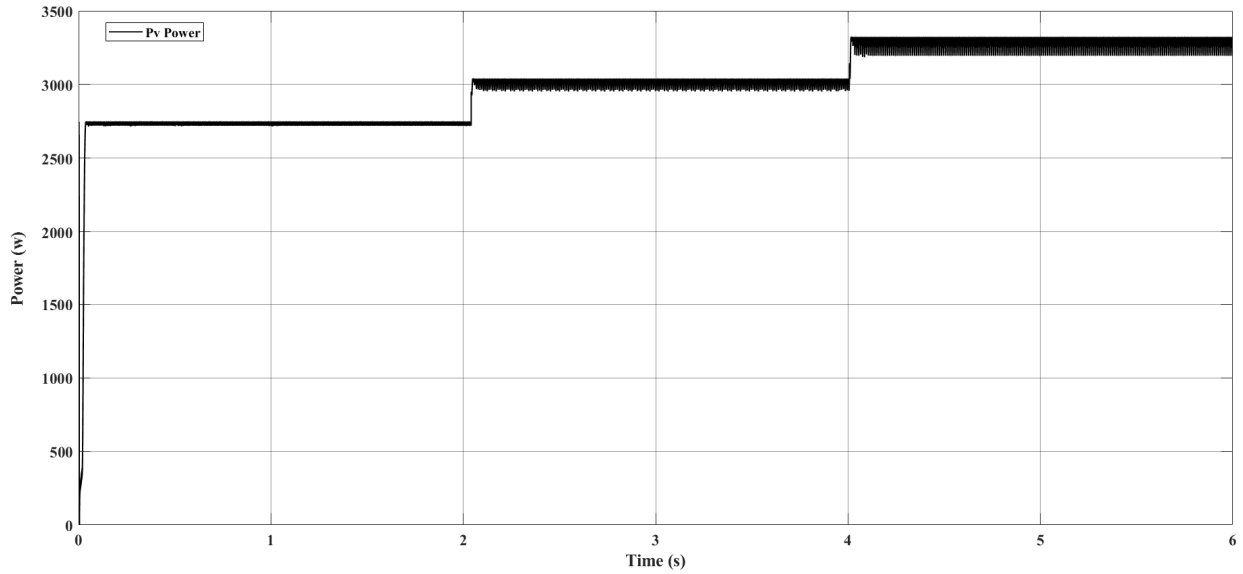


Figure III.9 : Puissance délivrée par le GPV par rapport à la température appliquée

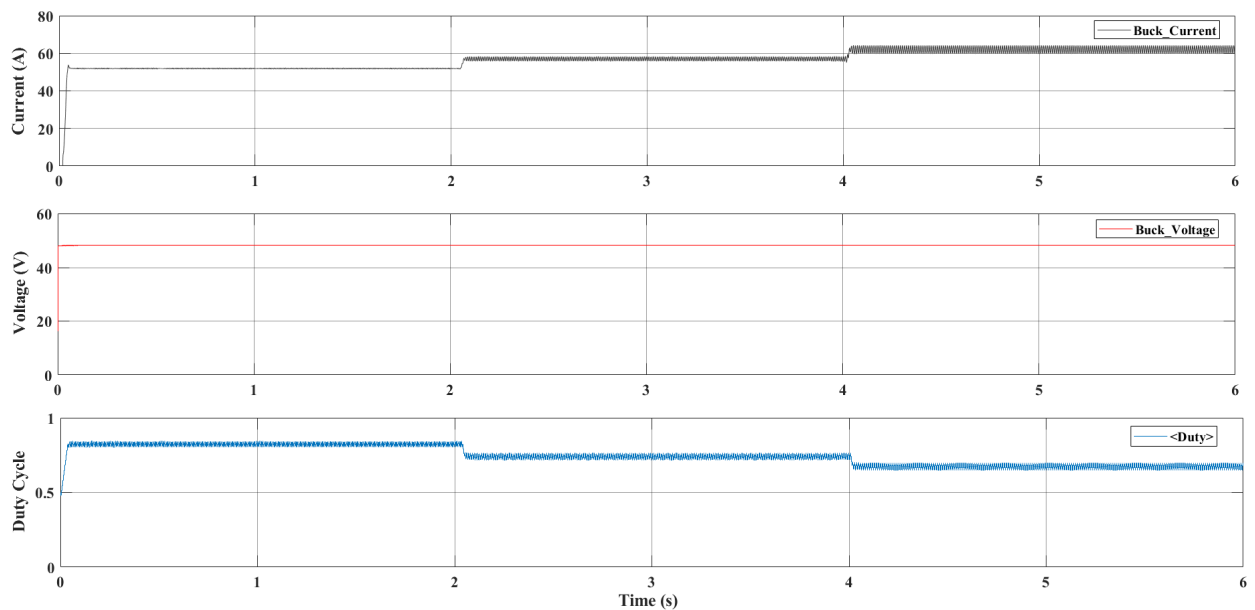


Figure III.10 : Effet de la température sur le courant et la tension en sortie du convertisseur DC-DC Buck par rapport au contrôle de l'MPPT.

Contrairement aux variations d'éclairement, la variation de la température à un effet moins important sur la puissance délivrée par le GPV comme illustré par **La Figure III.9**, en effet cette dernière diminue avec l'augmentation de la température.

Une variation en courant, de même sens que la variation en puissance, **Figure III.10**, en délivrant une tension fixe de 48 V au bornes de la charge (Batterie) avec un rapport cyclique

qui vari subtilement dans le sens opposé de la variation en puissance du fait que la température à un effet sur la tension du GPV.

II.2. Gestion de charge et de décharge des batteries

La gestion de la charge et la décharge des batteries accumulateur est primordiale pour augmenter leurs durées de vie. La **Figure III.11** schématise le bloc Simulink de gestion de la charge et la décharge des batteries. Ce dernier est constitué d'une batterie dont sa capacité est de 640Ah avec un état de charge programmable, et d'une commande logique de supervision qui permet de contrôler le comportement de la batterie dans les situations critiques à travers trois switch « Charging », « Direct» qui fait référence à l'alimentation directe du système par le GPV et « Discharging ».

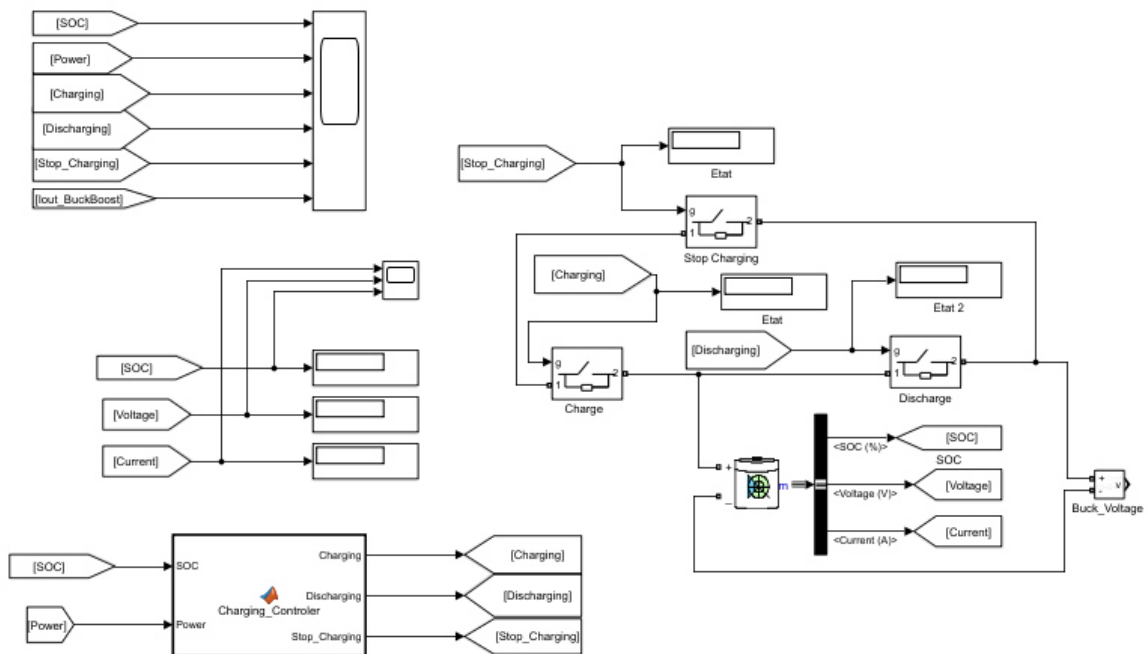


Figure III.11 : Schéma de simulation du bloc de la gestion de la charge et la décharge des batteries accumulateur

L'étage de supervision consiste à protéger la batterie dans les circonstances de surcharge et pour éviter les décharges profondes. Le principe de fonctionnement du bloc de supervision est expliqué dans le **Tableau III.2**:

Tableau III.2 : Fonctionnement de l'étage de supervision de la batterie.

SOC(%)	> 95	>95	<20	<20	20<<95
Puissance (w)	Suffisante	Insuffisante	Suffisante	Insuffisante	Suffisante/Insuffisante
Discharging (Déchargement)	0	1	0	0	1
Charging (Chargement)	0	0	1	0	1
Direct	1	0	1	0	0

Les différents états de gestion de la batterie sont illustrés par les figures suivantes :

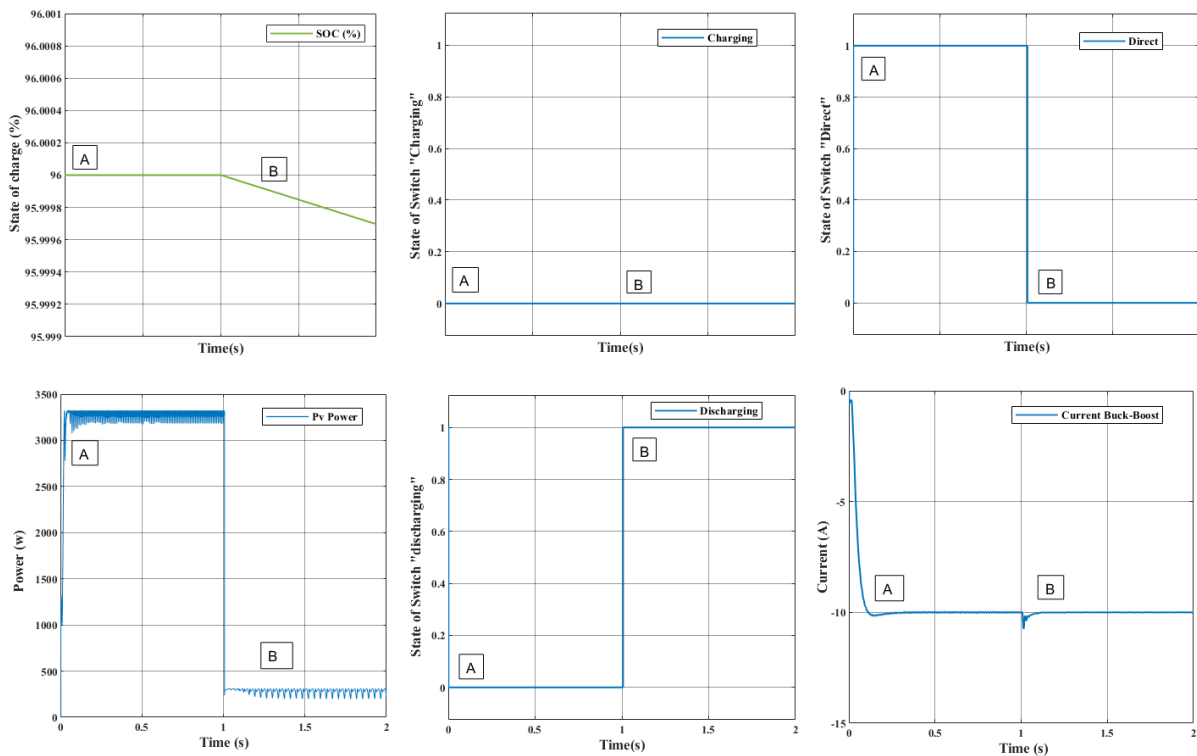


Figure III.12 : Résultat de simulation pour un état de charge (SOC) supérieur à 95%

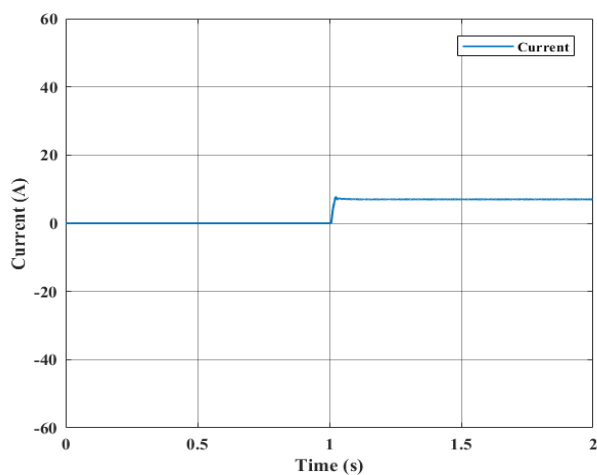


Figure III.13 : Courant de la batterie pour SOC supérieur à 95%.

On observe sur **La Figure III.12** que lorsque la puissance délivrée par le GPV est suffisante pour satisfaire les exigences de la charge (Phase **A**), la batterie maintient le même niveau de chargement, en revanche lorsque la puissance n'est pas suffisante (Phase **B**) la batterie fournit le manque d'énergie et complète ainsi l'énergie exigée par la charge et manager le processus de déchargement de cette dernière. Il est important de noter que le courant de décharge est positif comme illustré sur la **Figure III.13**.

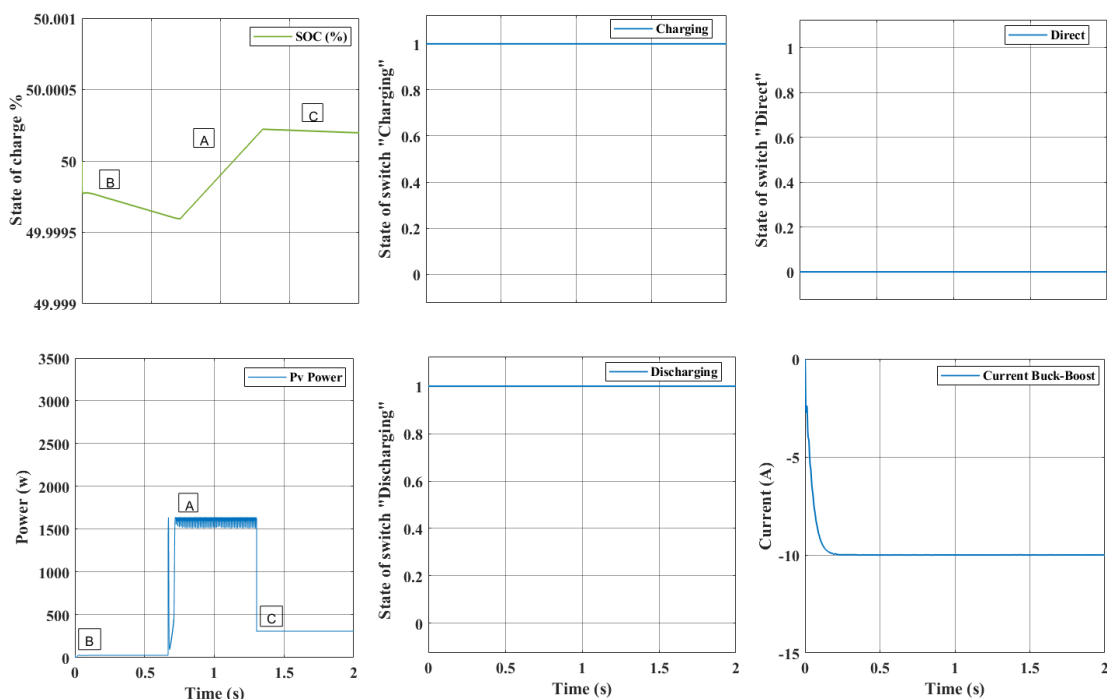


Figure III.14 : Résultat de simulation pour un état de charge entre 20% et 95%

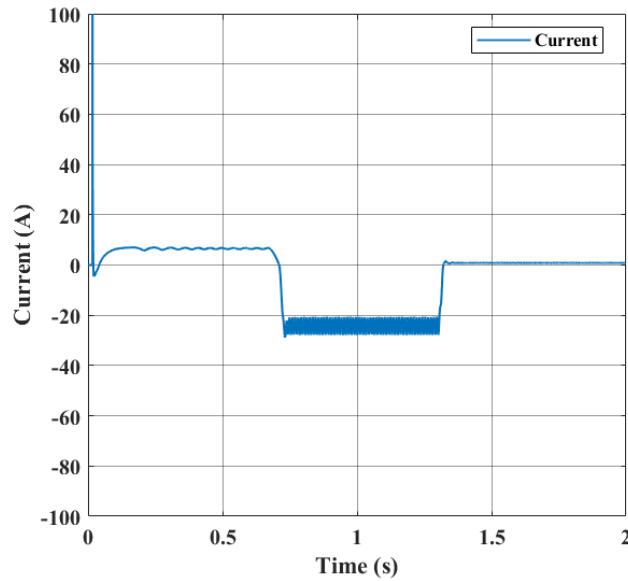


Figure III.15 : Courant de la batterie pour SOC entre 20% et 95%.

La **Figure III.14** représente l'état des switchs et l'état de charge de la batterie par rapport à la puissance délivré par le GPV et la charge. Dans le cas où la puissance délivrée par le GPV répond uniquement à l'exigence de la charge (Ya pas de supplément d'énergie Phase C) la batterie maintien le même niveau de chargement et elle se décharge lorsque cette puissance n'est plus suffisante (Phase **B**), autrement la batterie se charge en continue (Phase **A**). Il est important de noter que le courant de charge est négatif comme illustré sur la **Figure III.15**.

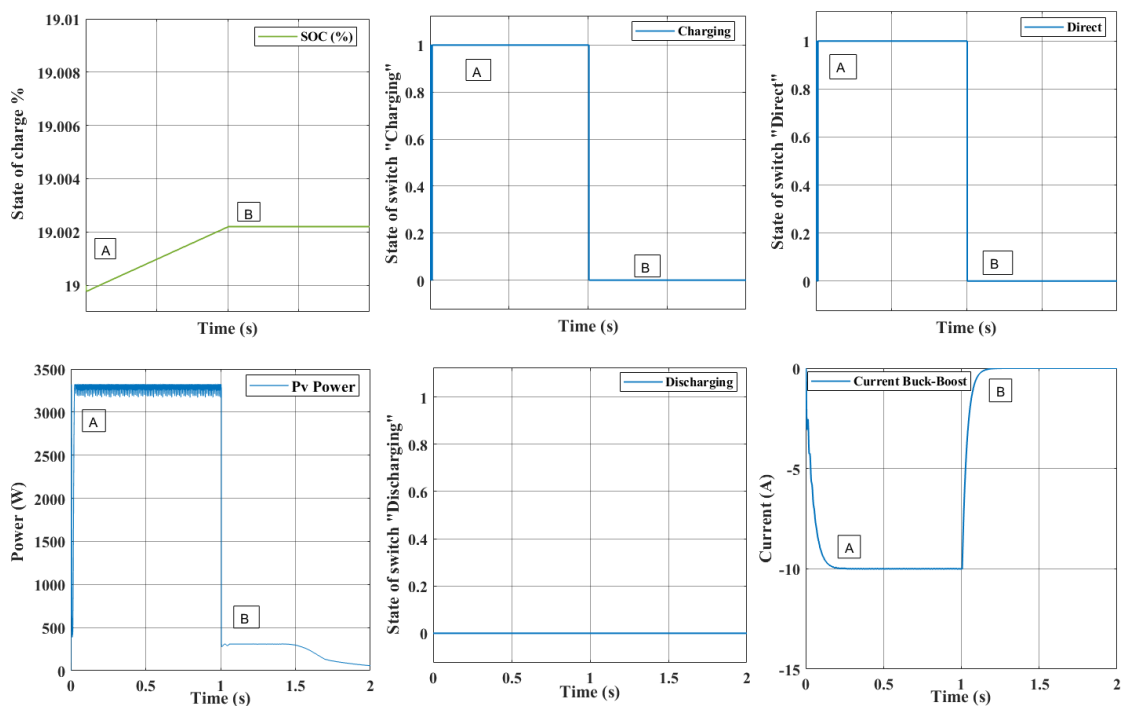


Figure III.16 : Résultat de simulation pour un état de fonctionnement inférieur à 20%.

La **Figure III.16** représente l'état des switches et l'état de charge de la batterie par rapport à la puissance délivré par le générateur PV et alimentation de charge. Contrairement au cas précédent le système ne fonctionne que si la puissance délivrée par le GPV est importante (Phase **A**) si non tout le système sera déconnecté (Phase **B**) par mesure de sécurité.

II.3. Convertisseur de la protection cathodique

Le schéma bloc Simulink du convertisseur DC-DC de protection cathodique et la charge sont schématisés par la **Figure III.18**. Ce bloc Simulink est constitué d'un convertisseur Buck-Boost alimenté par le système d'alimentation autonome, d'un régulateur PI, ainsi qu'un modèle d'une charge (pipeline) représenté par des résistances (anode, sol, pipe) estimées à $3,7\Omega$ et le potentiel de polarisation du pipeline comme mentionné dans le chapitre précédent.

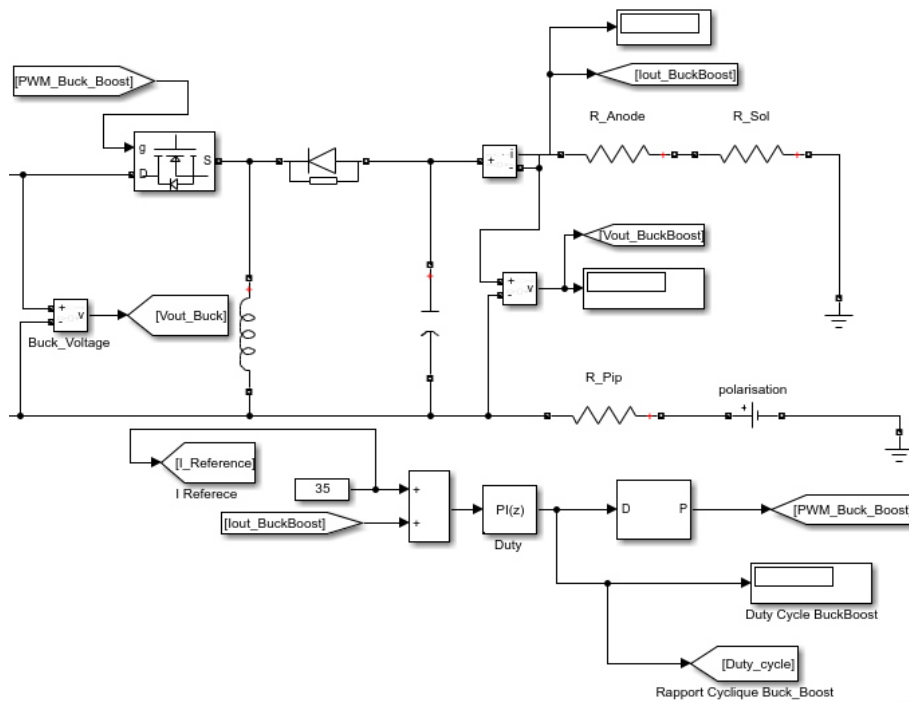


Figure III.17 : Schéma de simulation sous MATLAB-Simulink du convertisseur de PC, le modèle du pipeline et le système de régulation.

L'objectif principal de ce bloc de simulation est de reproduire par la simulation le fonctionnement de la PC afin de mettre en place une technique de contrôle et de commande en courant pour atteindre une valeur aux alentours de 10A (Estimation faite par SONATRACH lors de l'étude du projet).

Plusieurs scenarios de fonctionnement du convertisseur Buck-Boost ont été vérifiés par la simulation dans le but de visualiser la dynamique de réponse en tension et en courant du convertisseur par rapport aux consignes appliqués. Le rapport cyclique, le courant en sortie du convertisseur et la tension sont parmi les grandeurs électriques visualisées. Les différents résultats de simulation sont illustrés par les figures III.18-19 suivantes :

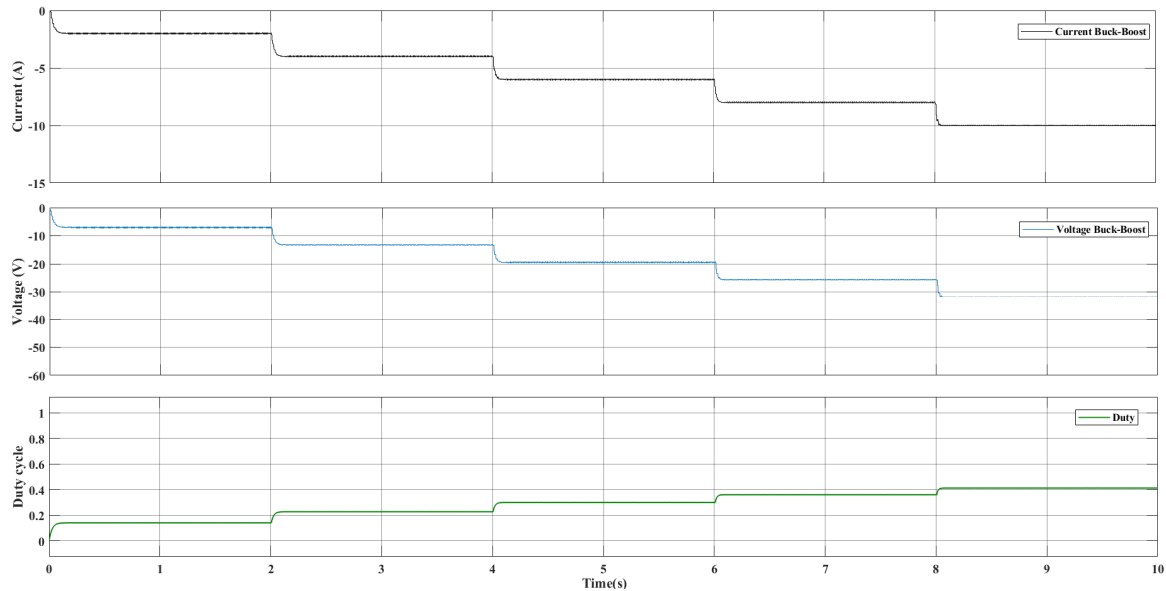


Figure III.18 : Tension et courant en sortie du convertisseur Buck-Boost pour différents rapport cyclique.

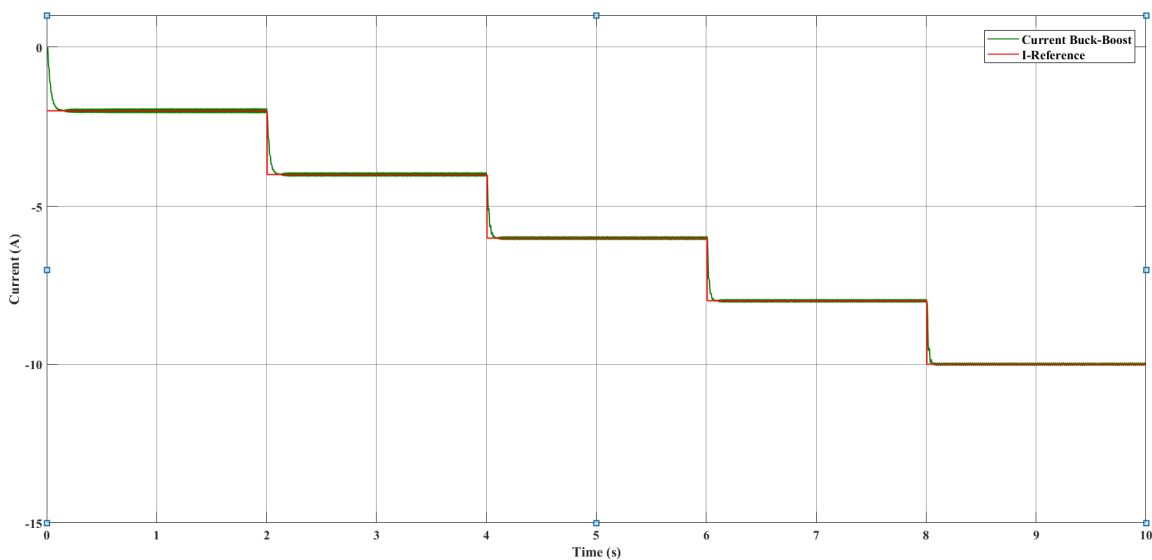


Figure III.19 : Superposition et dynamique de réponse en courant de sortie du convertisseur par rapport aux courants de référence appliqués.

Les différents résultats de comparaison entre les mesurés théoriques et ceux issues de la simulation sont exprimés par le **Tableau III.3** :

Tableau III.3 : Comparaison entre résultats théorique et résultats de simulation

$I_{ref}(A)$	$I_m(A)$	$v_{Th}(V)$	$v_m(V)$	$D_{th}(\%)$	$D_m(\%)$
1	1.002	3.14	3.4	9.2	8
5	4.99	16.5	16.3	28	26
10	10.01	31.4	31.91	43	41
15	15.02	47.1	47.4	53	51

Suite aux différents résultats de la simulation et de calcul, il est en effet possible d'affirmer que la dynamique de réponse en courant est très lisse, pas de fluctuation avec des dépassements acceptables, auquel nous confirmons la fiabilité du système de régulation appliqué et que la mesure suit la consigne convenablement et converge vers la valeur souhaitée avec le rapport cyclique approprié. Étant donné que les résultats théoriques sont très proches, voir même identiques dans certains cas par rapport aux résultats de la simulation.

III. Validation expérimentale

L'objectif fixé dans ce travail de mémoire, se résume au développement d'un convertisseur DC-DC dédié spécialement au système de protection cathodique à courant imposé. Ce dernier doit fournir des courants suivant le potentiel référence de polarisation de la PC. Ces convertisseurs comporte deux parties distinctes tels que :

- Une partie puissance comprenant les éléments d'électronique de puissance du convertisseur,
- Une partie commande constituée de microcontrôleurs

Notre première expérience dans l'expérimentation des convertisseurs DC-DC, et à la programmation des microcontrôleurs DSPIC30F pour la génération des signaux PWM ont été réalisées au sein du Laboratoire de Recherche et développement (DC R&D). Nous avons étudié le microcontrôleur DSPIC30F4011 afin de se familiariser avec ce composant électronique, que nous considérons l'élément clé dans l'expérimentation, la commande et à la génération des signaux PWM (Modulation de Largeur d'Impulsion) appliqués aux interrupteurs, transistors d'électroniques de puissances (MOSFET). Cette phase a constitué une étape préliminaire

importante pour comprendre le fonctionnement et les caractéristiques des DSPIC30F4011 ainsi qu'aux processus de génération des commandes PWM pour des asservissements en boucle applicable dans un premier temps au convertisseur Buck.

En seconde phase nous avons réalisés le circuit puissance du convertisseur Buck-Boost. Les différentes phases de fonctionnement du convertisseur ont été expérimentés par l'implémentations des différentes techniques commandes applicable, que ce soit en boucle ouverte, ou en boucle fermé au sein du Laboratoire LATAGE de l'université UMMTO, en se basant sur le cahier de charge et les résultats de la première partie.

III.1. DSPIC30F4011

Le dsPIC30F4011 est un microcontrôleur développé par Microchip Technology. Il fait partie de la famille dsPIC30F de microcontrôleurs il est basé sur une architecture de processeur de signal numérique (DSP) et de microcontrôleur. Ce composant constitue une solution innovante pour les applications de contrôle nécessitant des calculs intensifs en temps réel. [DSPIC] Notre sélection s'est portée sur le DSPIC30F4011 illustré sur la **Figure III.20** en raison de ses excellentes performances, son coût abordable, ainsi que ses nombreuses options qui répond au besoin du projet [54].

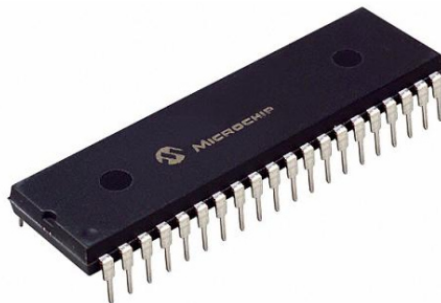


Figure III.20 : DSPIC30F4011 [54].

Conformément à l'illustration présentée dans la **Figure III.22**, le DSPIC30F4011 se compose de 40 broches dont un module de contrôle doté de 6 sorties PWM indépendantes qui sera utilisé pour implémenter la commande du convertisseur [54].

40-Pin PDIP

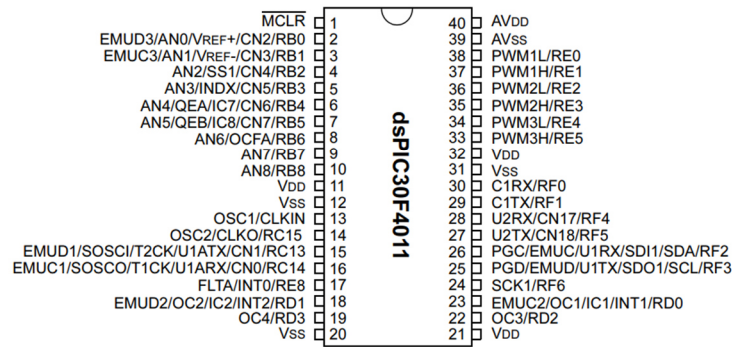


Figure III.21 : Diagramme des pins du DSPIC30F4011 [54].

- **Commande PWM par DSPIC30F4011**

Le dsPIC30F4011 peut générer 6 signaux PWM (Modulation de Largeur d'Impulsion), et pour cela, il est nécessaire de configurer les registres suivants : **PTMR** (PWM Time Base Register), **PTPER** (PWM Time Base Period Register), **PDC** (PWM Duty Cycle Register).

La PWM est générée à partir de comparaison effectuée entre les valeurs de ces registres comme le montre la **Figure III.22**. Le PTPER doit être calculé en fonction de deux facteurs : la période d'un cycle d'instruction et la période de la PWM comme montre l'équation (III.1). Tout d'abord, il est important de connaître la vitesse exacte d'exécution des instructions du microcontrôleur, qui dépend du quartz utilisé et la PLL associé. Dans notre cas on a utilisé un quartz de 4 MHz et une PLL x16, la vitesse de fonctionnement est alors de 16 MIPS [55].

$$PTPER = \frac{F_{CY}}{F_{pwm} \cdot (PTMR_{prescaler})} - 1 \dots (III.1)$$

Le temps d'activation de la sortie PWM est déterminé par la valeur du rapport cyclique. Cette valeur est comparée avec PTMR en utilisant le registre PDC.

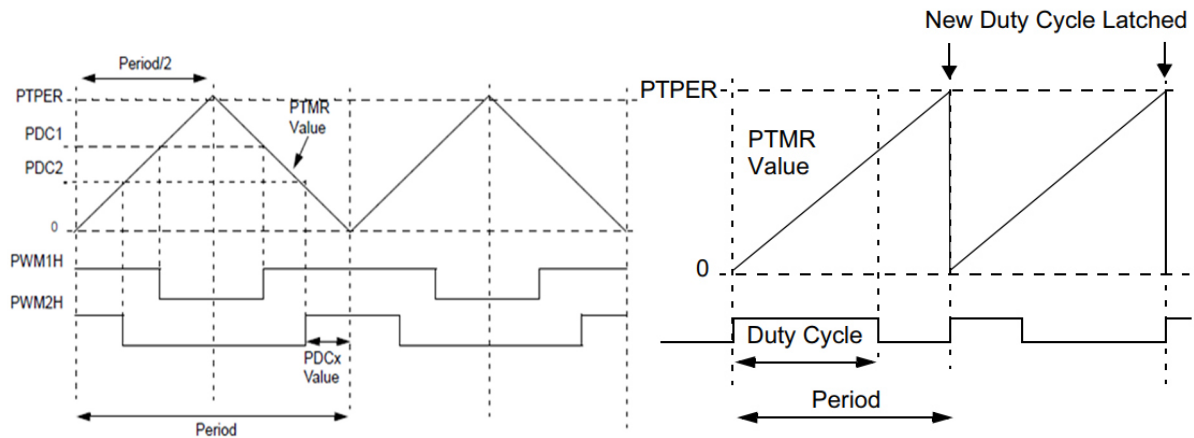


Figure III.22 : Les modes de génération de la PWM dans le DSPIC30F4011 [55].

III.2. Résultats en boucle ouverte

Avant de procéder à la mise en place du convertisseur Buck-Buck, nous voulons tout d'abord se familiariser dans un premier temps avec le convertisseur Buck et sa commande pour les fonctionnements en boucle ouverte. Ces étapes étaient très bénéfiques, et elles nous ont permis de trouver la proportionnalité entre l'entrée et la sortie du convertisseur respectivement le rapport cyclique et la tension de sortie du convertisseur.

Le bon d'essai, les différents branchements du convertisseur Buck, ainsi que les différents résultats d'expérimentations obtenus au niveau du laboratoire R&D sont illustrés par les figures III.23, III.24, et III.25.

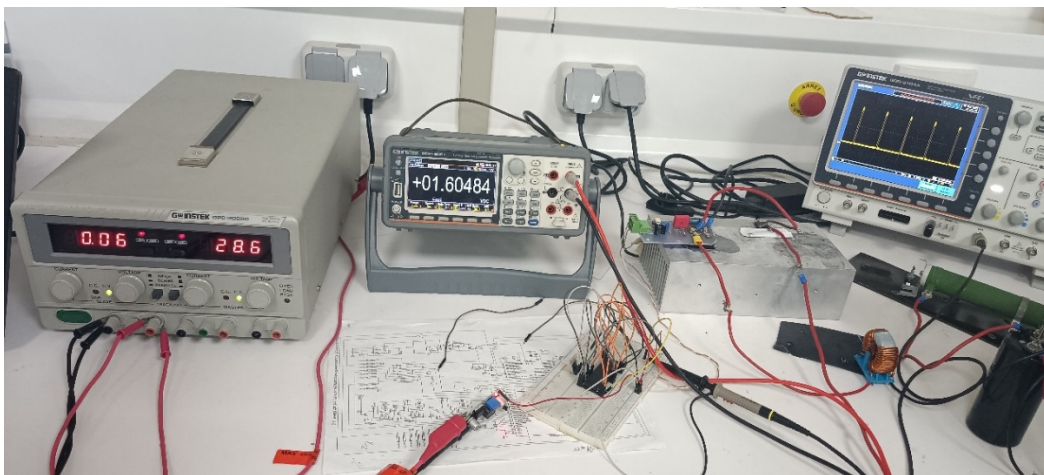


Figure III.23 : Tension de sortie du convertisseur Buck pour un rapport cyclique de 5%

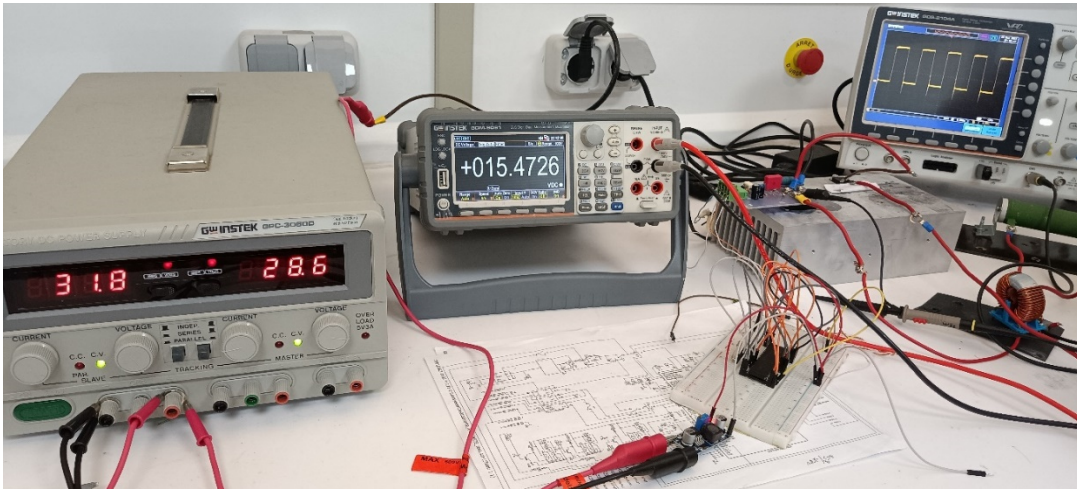


Figure III.24 : Tension de sortie du convertisseur Buck pour un rapport cyclique de 50%

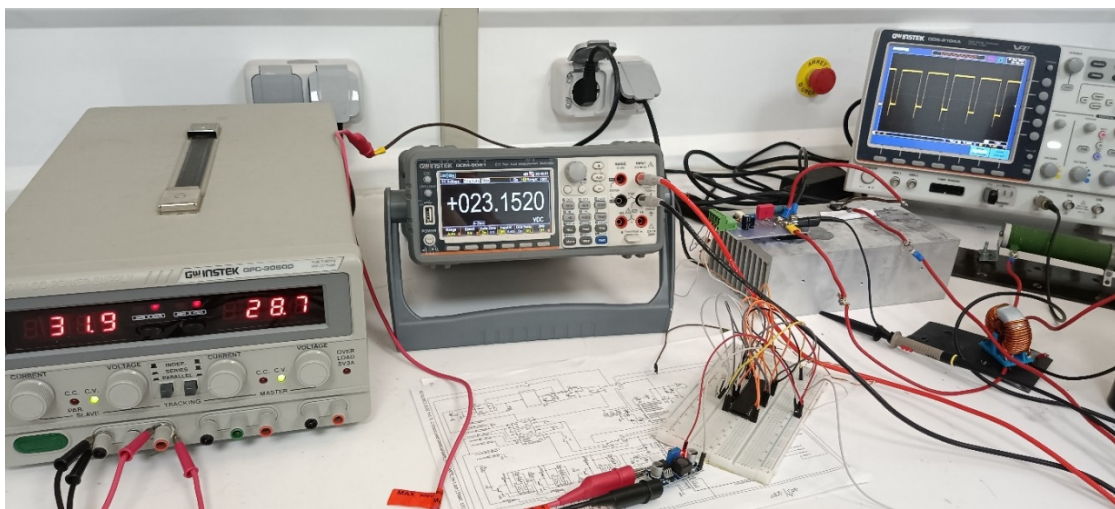


Figure III.25 : Tension de sortie du convertisseur Buck pour un rapport cyclique de 75%

Les Figures **III.23**, **III.24**, et **III.25** représentent les résultats des différentes commandes appliquées sur le convertisseur Buck. La proportionnalité recherchée est vérifiée entre la commande (le rapport cyclique) et la tension de sortie du convertisseur, c'est ce qui valide notre approche et l'étude appliquée.

Par la suite, d'autres résultats ont été expérimentés sur la deuxième partie de ce mémoire. Cette phase consiste à mettre en œuvre les différentes commandes en boucle ouverte et en boucle fermée applicables au convertisseur Buck-Boost, comme le convertisseur choisi spécialement au système de protection cathodique à courant. La **Figure III.26** illustre le bon d'essai mis en place au niveau du laboratoire LATAGE UMMTO.

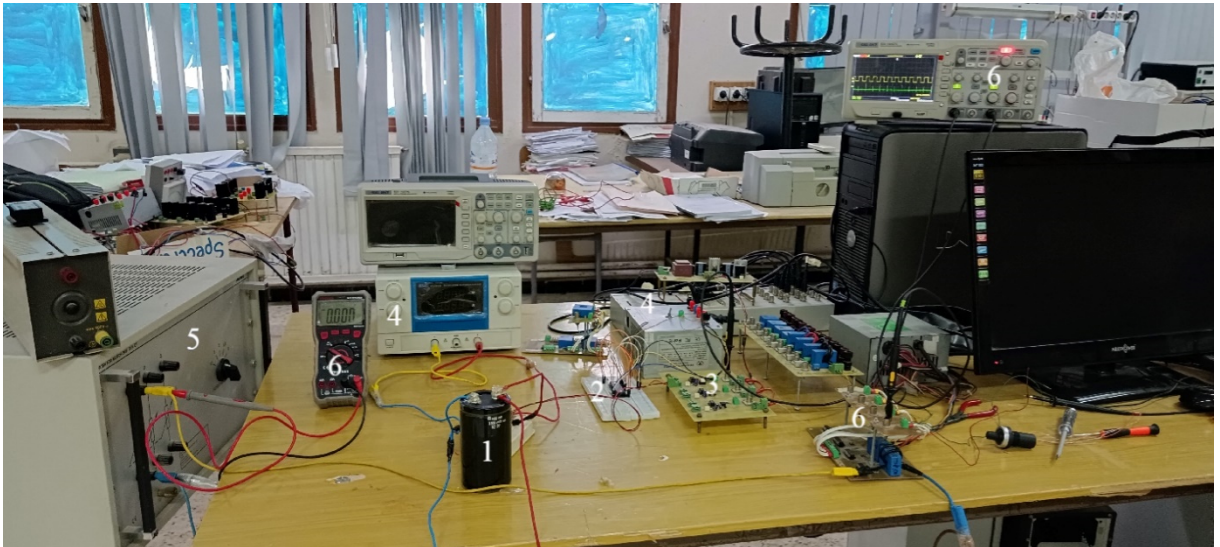


Figure III.26: Le bon d'essai.

- 1. Circuit de puissance :** Ce circuit se résume au convertisseur Buck-Boost dont les éléments ont été déjà dimensionnés dans le chapitre précédent.
- 2. Circuit de commande :** Constituer d'une carte de commande à base de microcontrôleur DSPIC30F4011
- 3. Carte Driver :** Elle est utilisée pour la commande des transistors et pour assurer une isolation galvanique entre le circuit de puissance, et le circuit de commande.
- 4. Alimentations stabilisées :** est un dispositif conçu pour fournir une tension de sortie stable et régulée, indépendamment des variations de la tension d'entrée ou des charges connectées. Ils seront utilisés pour alimenter des différents blocs du système séparément afin de créer une isolation galvanique là où c'est nécessaire.
- 5. Charge :** Elle se résume à une résistance variable dont la valeur a été fixée à 6Ω .
- 6. Equipement de visualisation et de mesure :** Afin de mesurer et de visualiser les résultats obtenus nous utiliserons un oscilloscope, un multimètre ainsi qu'un capteur de courant LA-55A.

Les différents résultats en courant et en tension pour un fonctionnement en boucle ouverte pour différents rapports cycliques sont illustrés par les figures suivantes :

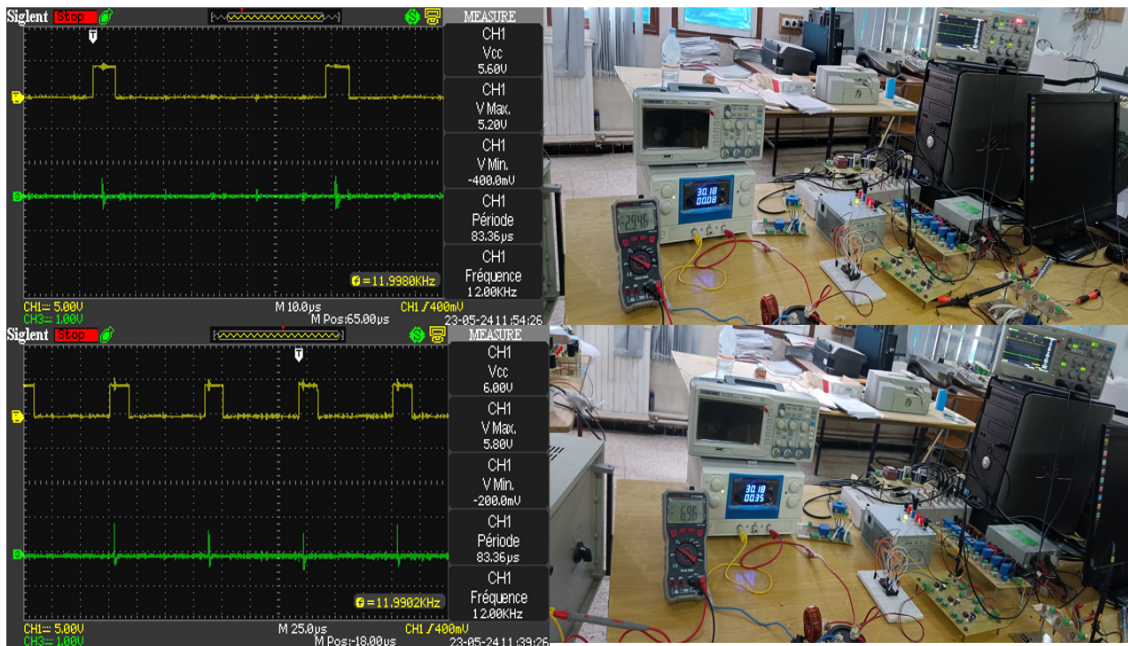


Figure III.27: Courant et tension de sortie du convertisseur Buck-Boost pour un rapport cyclique de 10% et 20%

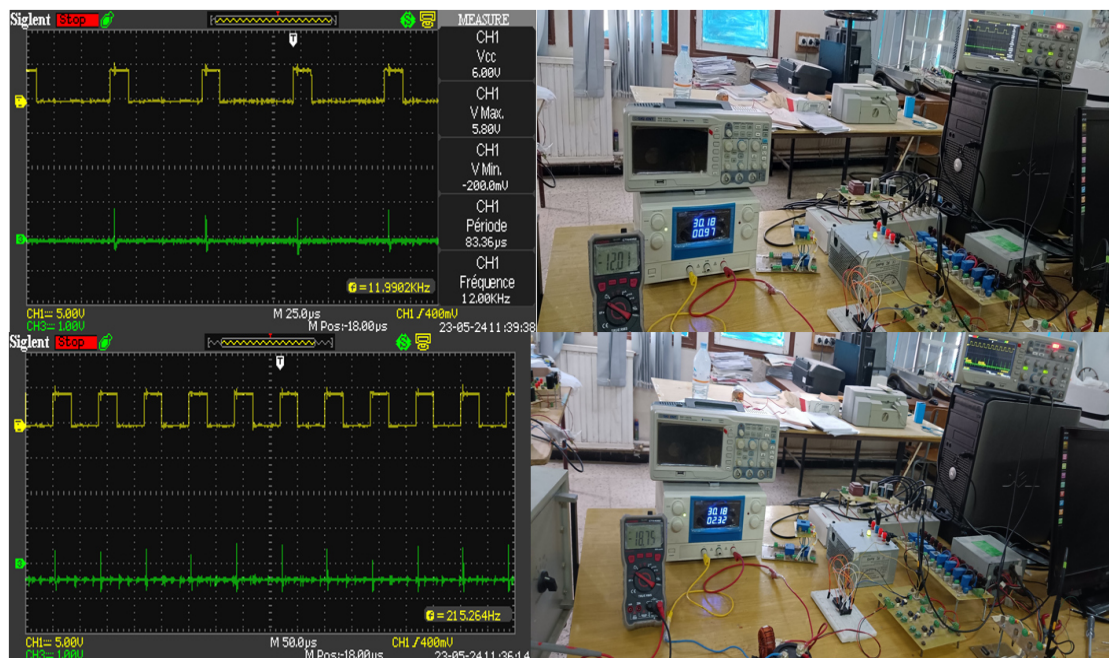


Figure III.28 : Courant et tension de sortie du convertisseur Buck-Boost pour un rapport cyclique de 30% et 40%.

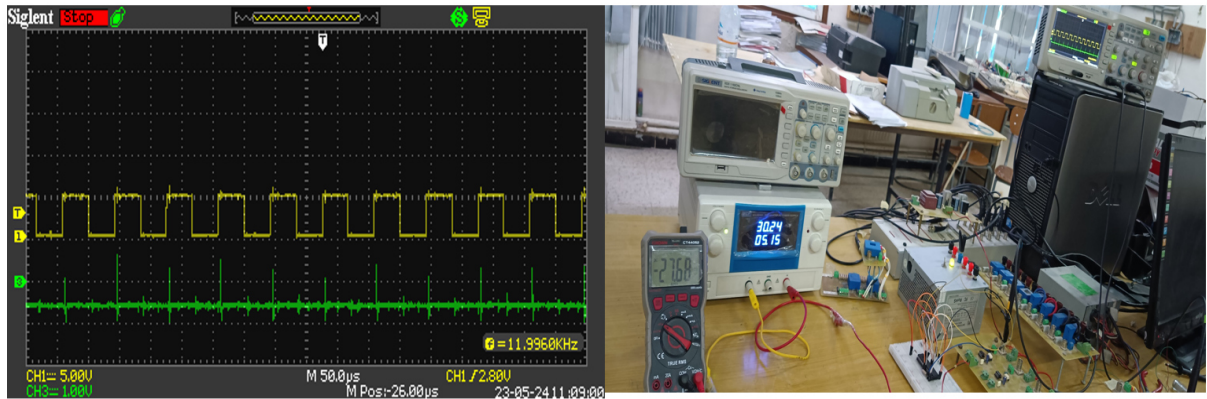


Figure III.29 : Courant et tension de sortie du convertisseur Buck-Boost pour un rapport cyclique de 50%

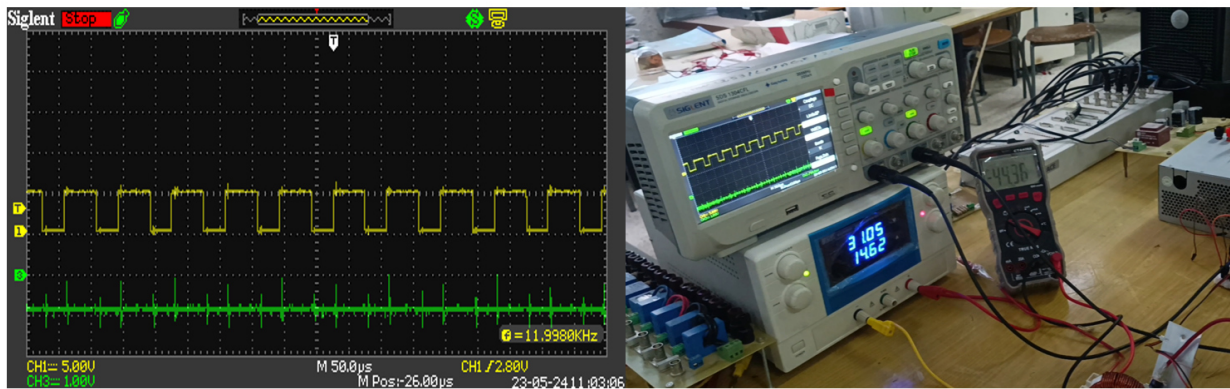


Figure III.30 : Courant et tension de sortie du convertisseur Buck-Boost pour un rapport cyclique de 60%

L'ensemble des résultats obtenus expérimentalement sont exprimé par Tableau III.4. Notons que nous avons arrêté l'expérimentation à un rapport cyclique de 60% du fait que l'alimentation utilisé ne peut délivrer un courant de 15A.

Tableau III.4 : Résultats expérimentale en boucle ouverte

D (%)	$v_{outTh} = \frac{D}{1-D} v_{in}$ (v)	R (Ω)	$I_{outTh} = \frac{v_{out}}{R}$ (A)	v_{out} (v)	I_{out} (A)
10	3.33	6	0.55	2.94	0.53
20	7.5	6	1.25	6.96	1.26
30	12.85	6	2.14	12.07	1.86
40	20	6	3.33	18.75	3.33
50	30	6	5	27.68	4.6

60	45	6	7.5	44.36	7.16
----	----	---	-----	-------	------

Les figures de **III.27** au **III.30** représentent les différents résultats d'expérimentation obtenue en boucle ouverte pour un rapport cyclique de 10% à 60% respectivement. En prenant en considération les pertes inhérentes à l'environnement expérimental ainsi qu'aux composants utilisés, ces résultats révèlent une remarquable concordance et proportionnalité entre les valeurs théoriques et les données expérimentales comme en témoigne le **Tableau III.4**.

Dans le but d'obtenir une commande réglable et ajustable pour les applications de protection cathodique, il est en effet important de mettre en place une commande robuste. La valeur souhaitée en tension et en courant de sortie du convertisseur doit être contrôlé en temps réel suivant le potentiel de polarisation de la PC. Cet ajustement est mis en œuvre par un potentiomètre multi tours caractérisant la consigne à appliquer à la commande. Ce dernier est une entrée analogique programmée dans le microcontrôleur DSPIC30F4011, afin de générer un rapport cyclique adéquatement à la consigne appliquée par le potentiomètre. Les résultats obtenus sont cohérents avec ceux présentés et observés précédemment dans les différentes **Figures III.27-III.30**.

III.3. Résultats en boucle fermé

Afin de tester la commande en boucle fermée, nous avons utilisé la carte C2000 de Texas Instrument disponible au laboratoire de LATAGE de Tizi-Ouzou. Cette carte de développement nous à permet d'adapter la commande en boucle fermé mis en œuvre dans le modèle de simulation développé sous l'environnement MATLAB-Simulink avec la partie expérimentation. Grâce à la bibliothèque Simulink de TI C2000, nous pouvons facilement générer des signaux de commande PWM sans avoir le recours à la programmation.

La commande en boucle fermé est l'une des techniques utilisées en automatique pour obtenir des performances statique et dynamique. Des régulateurs (PI, PID) sont souvent combinés entre la consigne et la mesure pour réguler la commande, qui est le rapport cyclique, et spécialement la PWM comme le signale de commande appliqué au convertisseur. Les différents résultats en courant de la commande en boucle fermé sont illustrés par les figures **III.31-III.32**.

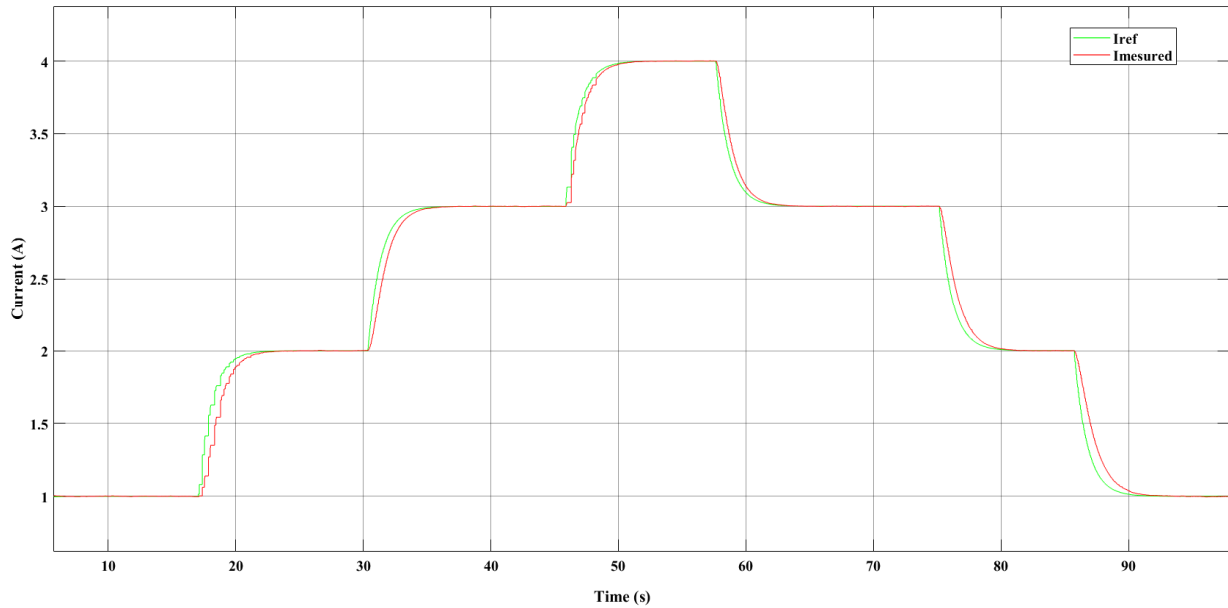


Figure III.31 : Dynamique de réponse en courant du convertisseur pour un fonctionnement en boucle fermé

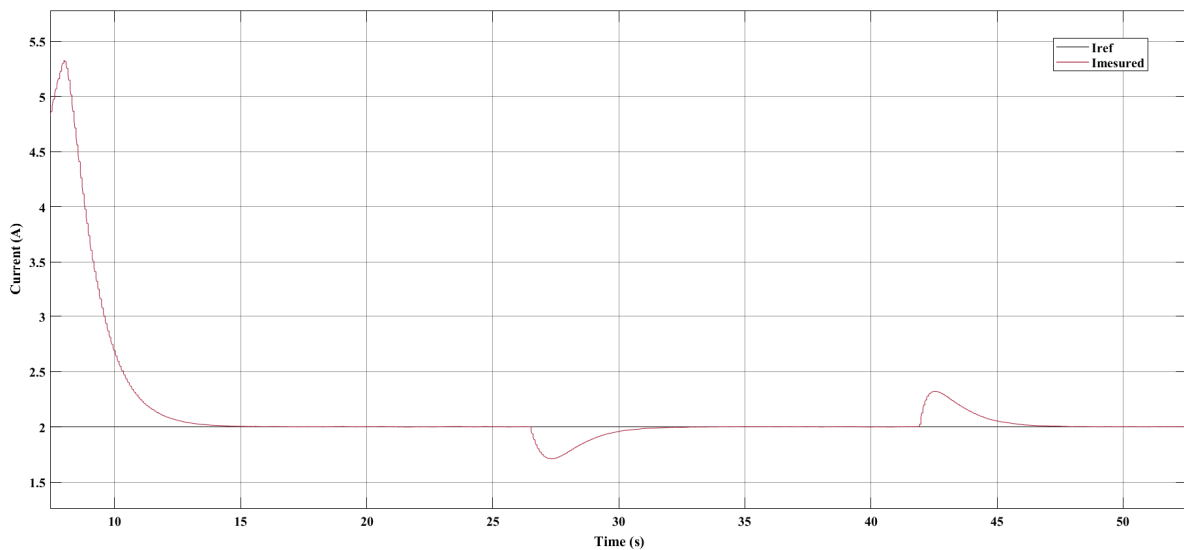


Figure III.32 : Dynamique de réponse en courant du convertisseur par rapport aux variations de la charge

La **Figure III.31** représente la valeur du courant mesuré par rapport au courant de référence. On observe clairement que le courant mesuré suit convenablement la consigne, de plus la dynamique de réponse en courant est très lisse. Ce comportement est stable quel que soit la perturbation appliquée (variation de charge) et n'est que momentanément perturbée, comme illustre la **Figure III.32** on constate une légère diminution pour une augmentation de charge

(12 Ω) et une légère augmentation pour une diminution de charge (6 Ω). Toutefois, dès que ces variations se produisent, la consigne est rapidement rétablie

IV. Conclusion

Ce chapitre se concentre sur la simulation intégrale du système et la validation expérimentale. La simulation permet d'explorer différentes options et de sélectionner la meilleure solution en étudiant le comportement du système dans différentes conditions. La simulation du panneau photovoltaïque montre l'impact de la température et de l'éclairement sur ses caractéristiques électriques, ce qui aide à comprendre son fonctionnement. De plus, la simulation de la commande MPPT confirme son efficacité en optimisant la puissance délivrée par le panneau. Le bloc de contrôle de chargement de la batterie assure la protection de la batterie en fonction de son état de charge et de la puissance disponible. Enfin, la simulation du bloc de régulation de protection cathodique démontre la régulation en courant avec des résultats proches des valeurs théoriques. La validation expérimentale a également été réalisée, notamment avec la génération de signaux PWM à l'aide du DSPIC30F4011 et de la carte C2000 de Texas Instruments. L'ensemble de ces simulations et expérimentations constitue une base solide pour le développement du projet.

Conclusion générale

Ce mémoire de Master a été réalisé dans le cadre d'un projet national de recherche visant à concevoir un système de protection cathodique autonome alimenté par un système hybride AC-PV.

Plusieurs essais et configuration dans la partie programmation des microcontrôleurs afin de réussir le paramétrage du rapport cyclique, comme la partie importante de la commande à appliquées au convertisseur Buck-Boost suivant l'objectif fixé dans ce travail de mémoire, qui se résume au développement d'un convertisseur DC-DC dédié spécialement au système de protection cathodique à courant imposé. Ce dernier doit générer des tensions, comme des courants suivant le potentiel référence de polarisation de la PC.

Les différents chapitres de ce mémoire ont abordé des sujets clés liés à la corrosion, à la protection cathodique, aux systèmes photovoltaïques et aux techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT).

Le premier chapitre a fourni une introduction approfondie aux mécanismes de corrosion, aux principes fondamentaux de la protection cathodique, ainsi qu'aux spécificités de la protection des ouvrages enterrés, tels que les pipelines. Le deuxième chapitre s'est concentré sur la modélisation des différents éléments constituant le système, y compris les générateurs photovoltaïques, les batteries, les convertisseurs DC/DC et les dispositifs de protection cathodique, tout en abordant les techniques de commande. Enfin, le troisième chapitre a présenté les résultats des simulations et de la validation expérimentale du système.

Ce travail a permis de mettre en évidence les principaux éléments du projet. Le premier chapitre a souligné l'importance de la protection cathodique dans la préservation des structures métalliques contre la corrosion, en mettant en évidence les défis spécifiques liés à la protection des ouvrages enterrés. Le deuxième chapitre a démontré la pertinence de l'énergie photovoltaïque comme source d'alimentation pour les systèmes de protection cathodique, en proposant une modélisation détaillée des différents composants. Enfin, le troisième chapitre a confirmé l'efficacité du système de protection cathodique conçu grâce aux simulations et aux expérimentations.

En conclusion, ce mémoire de Master a abouti au développement réussi d'un système de protection cathodique autonome alimenté par des panneaux photovoltaïques. Ce système offre une solution efficace pour la protection contre la corrosion des structures métalliques. Les résultats obtenus à travers les simulations et les expérimentations ont démontré la faisabilité et l'efficacité du système proposé. Ce travail représente une contribution significative dans le domaine de la protection

cathodique et ouvre la voie à de futures recherches et développements. Les perspectives pour ce travail incluent notamment l'optimisation du système en termes de rendement énergétique, l'exploration de nouvelles techniques de commande et l'adaptation du système à d'autres applications industrielles nécessitant une protection cathodique efficace.

Références bibliographiques

- [1] MARIF. A, Etude sur la méthode de maintenance par protection cathodique "Cas de la ligne de pipeline GZ1 40", Mémoire Pour l'Obtention du Diplôme du Master, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2014.
- [2] INERIS DRA-PREV, Document de synthèse relatif à une barrière technique de sécurité (BTS) "Protection cathodique", p 41, 2008.
- [3] BOUHRIA. K, Corrosion et protections des métaux, Support de cours, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, p52, 2022.
- [4] LACHACHIS, Etude de l'efficacité inhibitrice de corrosion dans l'acide sulfurique par la povidone iodée, Mémoire Pour l'Obtention du Diplôme du Master, Université abou-bakr Belkaid , Tlemcen, 2020.
- [5] BENZAADA. S, Corrosion, Support de cours, p79. Consulte le : 25/01/2023, sur : <https://www.academia.edu/17750878/Corrosion>
- [6] ARAGON. F, Corrosion et protections, Université du sud Toulon-var, Institut des sciences de l'ingénieur de Toulon et du var, 2005.
- [7] MILOUDI. Y, Supervision en temps réel de la protection cathodique d'un pipeline par un système d'information embarqué, Mémoire de Master, Génie industriel, Université Aboubakr Belkaïd, Tlemcen, 2018.
- [8] MOKTAR. N ; KESSAB. A, Corrosion des pipelines : Applications au tronçon Haoud El Hamra, Mémoire de Master, Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem, 2020.
- [9] KETHIRI. M, Dimensionnement d'une protection cathodique alimentée en photovoltaïque dédiée à la lutte contre la corrosion à la cimenterie « CILAS Lafarge » Biskra, Mémoire de Master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2020.
- [10] LARABI. O, Contribution à l'étude de l'inhibition de corrosion d'un acier au carbone par des composés organiques en milieu acide agressif, Mémoire de Master, Université Abou-bakr Belkaid, Tlemcen, 2017.

- [11] BENDJEBBOUR. A, Corrosion localisée des aciers API 5L - X52 de la ligne ASR/MP sollicitée en sol Algérien, Mémoire de magister, Université Abou-bakr Belkaid, Tlemcen, 2011.
- [12] SAIDI.T, Etude de la corrosion des pipelines, Mémoire de Master, Génie Mécanique, Université Aboubakr Belkaïd, Tlemcen, 2022.
- [13] ACADEMIA, Protection et lutte contre la corrosion, support de cours, consulté le 15/03/2023 sur :
https://www.academia.edu/31130937/CINQUIEME_PARTIE_PROTECTION_ET_LUTTE_CONTRE_LA_CORROSION.
- [14] ABDELLI. F, Dimensionnement d'un système de protection cathodique pour un bac de stockage d'hydrocarbure, mémoire de master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, 2017.
- [15] REKIBI. H ; LAMAA. I, Dimensionnement d'un Système Photovoltaïque Pour La Protection Cathodique d'un oléoduc OK1-34, Mémoire de Master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2022.
- [16] RAMDANI. K, Protection cathodique des ouvrages pétroliers par courant imposé Dimensionnement et réalisation d'un déversoir vertical, Mémoire de Master, Génie Mécanique, Université Abderrahmane mira Bejaia, 2018.
- [17] RAKOTONDRAIBE. L, Etude d'un dispositif de protection cathodique des pipeline d'ambatovy alimenté par énergie solaire photovoltaïque, mémoire de master, science des matériaux et métallurgie ,université d'Antananarivo école Supérieure Polytechnique, 2009.
- [18] GHELLAI. M, Etude sur le système de protection Cathodique PC et Maintenance de la Canalisation Multi produit ASR/ NAFTAL, Mémoire de Master, Génie Mécanique, Université Aboubakr Belkaïd, Tlemcen, 2013.
- [19] BENADEL. F, Etude Et Simulation d'une Commande MPPT Pour Système PV, Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf , M'sila, 2016.
- [20] AOUCHE. N, Conception d'une commande MPPT optimale à based'intelligence artificielle d'un système photovoltaïque, thèse de doctorat, Université Bourgogne Franche-Comté, 2020.
- [21] HARAOUBIA. M, Etude simulation d'un générateur de panneau photovoltaïque, Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2019.

- [22] ATCHOUM. S, Réalisation d'un convertisseur BUCK - MPPT, Mémoire de Master, Université Larbi ben m'hidi, Oum El-Bouaghi, 2017.
- [23] GHEZAL. A, Aspects techniques des projets solaires PV raccordés au réseau, formation sur les études de faisabilité technico- économique des projets photovoltaïques raccordées au réseau, ANME, 2014.
- [24] KHAREF. F, Commande MPPT pour les panneaux photovoltaïques en ombrage, Mémoire de Master, Université Ahmed Draïa-Adrar, 2021.
- [25] BEN AOUN. T ; MOUISSI. M, Etude d'un système couplant un générateur photovoltaïque et une charge électrolytique, Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2015.
- [26] LAHORE. C, Optimisation de commandes MPPT, Mémoire de Mater d'ingénieur CNAM, HAL, open science, 2012.
- [27] BEN NASSER. B, Etude et modélisation de la commande MPPT avec MATLAB, Mémoire de maître en sciences appliquées (M. Sc. A.), Université du Québec, Rimouski, 2021.
- [28] ABBES.H et al, Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque, Conférence Internationale des Energies Renouvelables, *International Journal of Control Energy and Electrical Engineering*, Sousse,Tunisie, 2013.
- [29] LAYACHI. Z, Etude et Commande adaptative par les Techniques Intelligentes des Systèmes non linéaires Application aux Systèmes Photovoltaïques, Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider de Biskra, 2017.
- [30] BOUTTE. A, Identification des paramètres internes d'une batterie pour des applications photovoltaïques, Thèse de doctorat, faculté de génie électrique, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2015.
- [31] MAZOUZ. K, Etude d'une Batterie de stockage dans un système Photovoltaïque, Mémoire de Master, Université Abderrahmane, Mira, Bejaia, 2021
- [32] SOLARIS STOR, Principe de fonctionnement d'une batterie solaire, RCS : Bourg-En-Bresse 442 600 011,2002.
- [33] RACHEDI. E ; FEDLAOUI. B, Modélisation et simulation du point de puissance maximum d'un système photovoltaïque, Mémoire de Master, Université Tahar Moulay de Saida, 2022.

- [34] MEHIDI. E ; HAMZA. F, Commande directe par la méthode "Perturb and Observe" (P&O) d'un système photovoltaïque, Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 2018.
- [35] NASRI. S ; BEN HAMIDA. O, Etude et simulation d'un hacheur (BUCK-BOOST), Mémoire de Licence, Université Badji Mokhtar d'Annaba, 2021.
- [36] ACADEMIA, Dimensionnement et conception des hacheurs Buck-Boost & Çuk, consulté le : 15/03/2023, sur :
https://www.academia.edu/31800283/Chapitre_II_Dimensionnement_et_conception_des_hacheurs_Buck_Boost_and_%C3%87uk_II_1_Introduction
- [37] LOUVRIER. Y, Etude et optimisation d'un convertisseur DC/DC à canaux multiples entrelacés, Thèse de doctorat, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, 2010.
- [38] DJELLALI E.H, Commande des Convertisseurs DC-DC par Mode de Glissement (Application pour le Module Energie de Bord des Microsatellites), Thèse de Magister, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, Ecole Doctorale des Techniques et Applications Spatiales, 2012.
- [39] EL AJJOURI. T, Méthode avancée de contrôle commande d'un onduleur monophasé pour une réduction de la banque de condensateurs, en vue d'accroître la durée de vie du convertisseur, Mémoire d'exigence partielle de la maîtrise en Génie Électrique, Université du Québec à Montréal, 2018.
- [40] GHERIB. S ; SAADI. M, Optimisation d'un convertisseur DC/DC Buck-Boost, Memoire de Master, Université Larbi Tebessi, Tebessa, 2020.
- [41] HARUNA SHANONO. I, et al, A Survey of Multilevel Voltage Source Inverter Topologies, Controls and Applications, *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)*, Université de Kano, Nigeria, 2018.
- [42] MIN. D et al, Control of power converters for distributed generation applications, thèse de Doctorat, Université de Ohio State, 2005.
- [43] MUHAMMAD. H, RASHID. P, Electronics Handbook Devices, Circuits, and Applications Book, Third Edition, Electrical and Computer Engineering University of West Florida, 2011
- [44] Document interne de la DCRD

- [45] KHARCHI. M, GUELLAL. A, La Commande MPPT Basée sur les Algorithmes Intelligents Destinée aux Applications Photovoltaïques : Etude comparative et implémentation sur FPGA, Le 4ème Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables, Ghardaïa, Alegria, 2016.
- [46] BABAI. H, Commande non linéaire d'un convertisseur multicellulaire, Mémoire de Master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2019.
- [47] BERROUBI. A, Commande par mode de glissement des convertisseurs Buck et Boost intégrés dans un système photovoltaïque, Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf de M'sila, 2016.
- [48] FERRAH. F, Etude et simulation d'un étage MPPT Pour un système à énergie renouvelable, Mémoire de Master, Université Larbi Ben M'hidi, Oum El bouaghi ,2013.
- [49] TEXAS INSTRUMENTS, BASIC Calculation of a Buck Converter's Power Stage, Application Report, 2015.
- [50] OBEIDI, Commande des Hacheurs MPPT par logique floue, Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, El-Harrach, ALGER, 2006
- [51] KULARATNA. N, Power Electronics Design Handbook : Low-Power Components and Applications (EDN Series for Design Engineers), 1st Edition, 300 pg, 1998.
- [52] BRIHMAT. F, Etude conceptuelle d'un système de conditionnement de puissance pour une centrale hybride PV/Eolien, Mémoire de Magister, 2012.
- [53] KHALFALLAH. F, Etude de la protection cathodique par courant imposé, obtenu par énergie solaire, d'un système métallique, Mémoire de Master, Génie des Matériaux, Ecole Nationale Polytechnique, 2016.
- [54] MICROCHIP, Electronic components datasheet search, General Purpose and Sensor Families High-Performance Digital Signal Controllers « dsPIC30F4011/4012 Data Sheet », 2004, consulté le : 20/03/2023, sur : [HTTP://WWW.MICROCHIP.COM/](http://www.microchip.com/)
- [55] MICROCHIP, Electronic components datasheet search, « dsPIC30F Family Reference Manual »,2005. Consute le 10/04/2023, sur : [HTTP://WWW.MICROCHIP.COM/](http://www.microchip.com/)