



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de La Recherche Scientifique

جامعة غرداية

Université de Ghardaïa

N° d'enregistrement

كلية العلوم والتكنولوجيا

...../...../.....

Faculté des Sciences et Technologies

قسم الآلية و الكهروميكانيك

Département d'automatique et électromécanique

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : électromécanique

Spécialité : Energies renouvelables en électrotechnique

Thème

***Conception et implémentation d'un système de
stockage à base batteries dans une chaîne de
conversion photovoltaïque***

Présenté par :

BOUHICHA Abdelhamid

Soutenu publiquement le 13/09/2023

Devant le jury :

BOUDABIA Saad

professeur à l'Université de Ghardaïa

Président

BAHRI Ahmed

professeur à l'Université de Ghardaïa

Examineur

MOSBAH Charaf Abdelkarim

Docteur à l'Université de Ghardaïa

Examineur

BENLAHBIB BOUALEM

Docteur à URAER. Ghardaïa

Encadreur

Année universitaire 2022/2023

Remerciements

Avant tout, je remercie le Tout-Puissant ALLAH de m'accorder une bonne santé et la volonté de commencer et de terminer cette thèse.

Je suis extrêmement reconnaissant envers

***Dr : BENLAHBIB BOUALEM** et pour leur assistance inestimable et leur guidance. Sans leur supervision exceptionnelle, leur patience, leur minutie et leur disponibilité tout au long de la préparation de cette thèse, elle n'aurait pas été aussi enrichissante et réussie.*

J'exprime également ma gratitude aux membres du jury qui ont accepté ce travail.

Mon appréciation va également à tous mes professeurs pour leur générosité et leur immense patience malgré leurs responsabilités académiques et professionnelles.

Mes sincères remerciements sont également adressés à toutes les personnes qui m'ont aidé et soutenu, directement ou indirectement.

BOUHICHA Abed ELHAMID

Dédicace

I dedicate this humble dedication to the soul of my father, may God have mercy on him, and to my esteemed mother, may God prolong her life with health and happiness And to the soul of my dear grandmother, may God have mercy on her, whose love, encouragement, and tireless sacrifices created a warm and nurturing environment for my academic success. I hope to make you proud.

To my brothers and sisters, you are my family and closest friends. Your unwavering support has been a source of inspiration and strength for me. I am deeply grateful to you.

A sincere thank you goes to all my teachers, who have guided, inspired, and encouraged me throughout my educational journey. Your expertise and dedication have been invaluable.

To my dear friends and colleagues M.R et B.A et B.H et L.W .want to express my profound gratitude for your friendship and unwavering support. You bring joy and happiness to my life.

Lastly, I want to thank everyone who has given me the strength to persevere, believe in myself, and pursue my dreams. Your unwavering support has been a true blessing in my life.

Sincerely : Bouhicha Abd el Hamid

Résumé :

Les combustibles fossiles prévalent dans la consommation énergétique mondiale, avec des impacts néfastes sur l'environnement. Les systèmes photovoltaïques sont cruciaux en tant que sources d'énergie renouvelable, contribuant à la réduction des combustibles fossiles. Les avancées technologiques ciblent l'amélioration de la production, du stockage et de la gestion de l'énergie. Cette étude se focalise sur l'optimisation de la gestion énergétique dans les systèmes photovoltaïques. L'utilisation de sous-systèmes de stockage d'énergie, de convertisseurs CC-CC et d'algorithmes MPPT est essentielle pour relever ces défis. Des méthodes de modélisation et de contrôle ont été développées pour maximiser la production d'énergie photovoltaïque. Les simulations MATLAB/Simulink démontrent une meilleure efficacité énergétique et une fiabilité accrue dans diverses conditions (température, rayonnement, charge). Dans notre étude expérimentale en laboratoire, nous avons validé les résultats de simulation en utilisant le microcontrôleur DSPACE1104 en conjonction avec le logiciel Control Desk. Les conclusions de notre enquête encouragent des futurs travaux sur la gestion de l'énergie dans les systèmes photovoltaïques.

MOTS CLÉS: Combustibles fossiles, Systèmes photovoltaïques, Énergie renouvelable, Systèmes de stockage d'énergie, Convertisseurs DC/DC, Suivi point de puissance maximale (MPPT), MATLAB/Simulink."

Abstract:

Fossil fuels dominate global energy consumption, with harmful impacts on the environment. Photovoltaic systems are critical as renewable energy sources, contributing to fossil fuel reduction. Ongoing technological advancements target improved production, storage, and energy management. This study focuses on optimizing energy management in photovoltaic systems. The use of energy storage subsystems, DC-DC converters, and MPPT algorithms is essential to address these challenges. Modeling and control methods have been developed to maximize photovoltaic energy production. MATLAB/Simulink simulations demonstrate enhanced energy efficiency and increased reliability under various conditions (temperature, radiation, and load). In our laboratory experimental study, we validated simulation results using the DSPACE1104 microcontroller in conjunction with Control Desk software. The conclusions of our investigation encourage future work on energy management in photovoltaic systems.

KEY WORDS: Fossil fuels, Photovoltaic systems, Renewable energy, Energy storage systems, DC/DC converters, Maximum power point tracking (MPPT), MATLAB/Simulink.

ملخص

الوقود الأحفوري يعتبر المصدر الرئيسي لاستهلاك الطاقة على مستوى العالم، مما ينتج عنه تأثيرات ضارة على البيئة. في هذا السياق، تأتي الأنظمة الكهروضوئية لتلعب دورًا بارزًا كمصدر للطاقة المتجددة. التطورات التكنولوجية الجارية تهدف إلى تحسين إنتاج الكهرباء وتخزينها، بالإضافة إلى تعزيز الطاقة. تركز هذه الدراسة على تحسين تسيير الطاقة في الأنظمة الكهروضوئية من خلال استخدام الخلايا الكهروضوئية ومحولات DC/DC ووسائل تخزين الطاقة. وتُعد أنظمة تخزين الطاقة وناقلات التيار المستمر وخوارزميات تتبع نقطة الطاقة القصوى (MPPT) ضرورية لتحقيق الأهداف المذكورة. تم تطوير تقنيات النمذجة والتحكم لزيادة إنتاج الطاقة في الأنظمة الكهروضوئية. تظهر نتائج العمليات التجريبية والمحاكاة باستخدام MATLAB/Simulink فعالية عالية في استخدام الطاقة وموثوقية محسنة في مختلف الظروف، مما يسهم في تقليل التأثيرات الناتجة عن التغيرات المناخية مثل درجة الحرارة وكمية الإشعاع الشمسي. في دراستنا التجريبية في المختبر، تم تحقيق نتائج مماثلة باستخدام متحكم DSPACE1104 بالتزامن مع برمجيات Control-Desk. هذه النتائج تعزز التفاؤل بشأن جهودنا المستقبلية في تحسين تسيير الطاقة داخل أنظمة الخلايا الشمسية.

كلمات مفتاحية: الوقود الأحفوري، الطاقات المتجددة، الأنظمة الكهروضوئية، محولات DC / DC، أنظمة تخزين الطاقة، خوارزميات تتبع نقطة الطاقة القصوى (MPPT)، MATLAB / Simulink

Table des matières

Remerciements	
Dédicace	
Résumé :	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale	1
Chapitre I: État de l'Art sur différentes technologies du système de stockage	4
I.1 Introduction.....	5
I.2 Les différentes ressources d'énergie :	5
I.2.1 Les énergies fossiles :	5
I.2.1.1 Les Inconvénients des énergies fossiles :	6
I.2.2. Les Energies renouvelables :	6
I.3. L'évolution du mix électrique mondial.....	7
I.3.1 L'état des énergies renouvelables en Algérie.....	9
I.4. Les défis liés à l'intégration des sources d'énergie renouvelables.....	10
I.4.1. L'intermittence.....	10
I.5. Analyse des défis et des interrogations sur la continuité de l'approvisionnement et le stockage de l'énergie.	10
I. 6. Le Système de stockage d'énergie :	11
I.6.1 Exposition des différentes technologies de stockage :.....	12
I.7 Critères de choix d'une technologie de stockage :.....	21
I. 8 Comparaison des différentes technologies de stockage de l'électricité :	22
I. 9 Energie solaire (photovoltaïque) :	23
I.9.1 La cellule photovoltaïque :	23

I.9.2. Technologie d'une cellule photovoltaïque :	24
I.9.3. Les types de Système photovoltaïque :	25
I. 9.4. Avantages et inconvénients d'énergie photovoltaïque :.....	26
I.10. Conclusion :	27
Chapitre II: Modélisation de la chaine de production Photovoltaïque.....	28
II.1 Introduction	29
II.2. La Chaîne de conversion du système photovoltaïque	29
II.3. Différents modèles mathématiques du générateur photovoltaïque	30
II.3.1. Avantages et inconvénients de chaque modèle	30
II.3.2. Modélisation de la cellule photovoltaïque	31
II.3.3. La caractéristique courant-tension (I_{pv} , V_{pv}) d'une cellule photovoltaïque	33
II.3.4. Grandeurs caractéristiques d'une cellule photovoltaïque	34
II.4. Simulation du générateur photovoltaïque.....	35
II.4.1 Choix et caractérisation du module photovoltaïque	35
II.4.2. Influence du l'éclairement sur les module PV	35
II.4.3. Influence de la température sur les module PV.....	36
II.4.4. Influence du rayonnement sur les modules Photovoltaïques	37
II.5. Générateur Photovoltaïque GPV	38
II.5.1 Rendement d'un générateur photovoltaïque	39
II.6. Modélisation du convertisseur DC-DC.....	39
II.6.1. Modélisation du Convertisseur DC/DC (Boost)	40
II.6.2. Modèle mathématique équivalent.....	41
II.6.3. Modèle approximé du convertisseur Boost.....	42
II.7. Définition de la commande suivie du point de puissance maximale (PPM).....	43
II.7.1. Différentes techniques de suivi du point de puissance maximale (PPM).....	43
II.7.2. La méthode de perturbe et observe (P&O)	44

II.8. Conclusion	50
Chapitre III: Modélisation de sous système de stockage et gestion d'énergie
III.1. Introduction	53
III.2. Description du système étudié.....	53
III.3. Modélisation du convertisseur Buck-Boost	54
III.3.1. Mode de fonctionnement du convertisseur Buck-Boost.....	54
III.3.2. Mode mathématique	56
III.4. Modélisation de stockage :.....	56
III.4.1. Modèle de la batterie en mode de charge :	56
III.4.2. Modèle de la batterie en mode de décharge:.....	57
III.4.3. La tension de la batterie :	57
III.4.4. Courant de batterie :	58
III.4.5. Rendement de la Batterie :	58
III.5. Régulation de la tension du bus continu :	59
III.6. Algorithme de gestion de puissance du système Photovoltaïque	60
III.7. Résultats de simulation :	61
III.8. Conclusion.....	64
Chapitre IV: Réalisation expérimentale du système étudié	65
IV.1 Introduction:	66
IV.2 Description du banc d'essai expérimental.....	66
IV.3 Les différents éléments des chaînes de conversion photovoltaïque	69
IV.3.1 Générateur PV:	69
IV.3.2 dSPACE 1104:.....	69
IV.3.3 Les capteurs de tension et de courant :.....	71
IV.3.4 Le Convertisseur DC-DC Elévateur (Boost):.....	72
IV.3.5 Le Convertisseur DC-DC Buck- Boost bidirectionnel.....	72

IV.3.6 La charge résistive	73
IV.3.7 Le batterie AGM	73
IV.4 Résultats expérimentaux et discussion	74
IV.4.1 Résultats de l'algorithme MPPT sous des conditions climatiques stables.....	74
IV.4.2 Résultats de l'algorithme MPPT sous des conditions climatiques variables et en l'absence de réglage du bus DC.....	74
IV.4.3 Résultats de l'algorithme MPPT sous des variations des conditions climatiques et avec la présence de réglage du bus DC	75
IV.4.4 MPPT sous des variations de l'impédance de charge	76
IV.4.5 Gestion de puissance de système PV avec des batteries d'accumulation	77
IV.5 Conclusion	79
Conclusion générale	82
Références:	82

Liste des figures

Figure I.1: L'évolution du mix électrique mondial en 2022 [2]	8
Figure I.2: Capacité annuelle d'énergie (PV) installée dans le monde, 2011-2021. [3]	8
Figure I.3: L'état de l'énergie renouvelable au niveau l'Algérie.[4].....	9
Figure I.4: Conception du système de Stockage (Super Magnetic Energy Storage) (SMES)..	13
Figure I.5: Stockage par condensateurs à double couche (super condensateurs).....	14
Figure I.6: Stockage par volant d'inertie [7].....	15
Figure I.7: Stockage par gravitaire(pompage) hydraulique	16
Figure I.8: Stockage à air comprimé en caverne	17
Figure I.9: Principe de fonctionnement d'un stockage thermique. [8].....	17
Figure I.10: Stockage thermochimique couplé à un système solaire	18
Figure I.11: Stockage d'énergie grâce à l'hydrogène. [7]	19
Figure I.12: Schéma et principe fonctionnement d'une batterie à circulation Source. [9].....	20
Figure I.13: La Décharge et charge d'un accumulateur	20
Figure I.14: Critères pour choisir une technologie de stockage d'énergie. [7].....	22
Figure I.15: Les Capacités des différents moyens de stockage d'énergie. [8].....	22
Figure I.16: cellule photovoltaïque (PV) et principe de fonctionnement.[12].....	23
Figure I.17: Système photovoltaïque autonome.....	25
Figure I.18: Système photovoltaïque (PV) raccordé au réseau électrique.....	26
Figure II.1: Chaîne élémentaire de conversion PV avec une commande MPPT	30
Figure II.2: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque	31
Figure II.3: Influence des résistances série et shunt d'une cellule photovoltaïque.....	33
Figure II.4: Caractéristique courant-tension (I_{pv} , V_{pv}) d'une cellule photovoltaïque	33
Figure II.5: Effet de l'éclairement sur la caractéristique, (V_{pv} , I_{pv})	36
Figure II.6: Effet de la température sur la caractéristique, (V_{pv} , I_{pv})	36
Figure II.7: Effet de l'éclairement sur la caractéristique (V_{pv} , P_{pv})	37
Figure II.8: Les composants d'un générateur photovoltaïque (GPV).....	38
Figure II.9: Schéma fonctionnel général du système PV avec MPPT.....	40
Figure II.10: Circuit électrique du convertisseur Boost.....	41
Figure II.11: Circuits équivalents du convertisseur Boost, (A) : S fermé, (B) : S ouvert.	42
Figure II.12: classification des algorithmes de suivi du PPM.....	43

Figure II.13: Schéma du principe de la méthode P&O.....	45
Figure II.14: Algorithme de perturbation et de l'observation(P&O).....	46
Figure II.15: Diagramme fonctionnement du système pv (Ppv, T).....	48
Figure II.16: Diagramme fonctionnement du système PV (Ipv, T)	48
Figure II.17: Diagramme fonctionnement du système PV (Vpv, T).....	49
Figure II.18: Diagramme fonctionnement du système PV (Ich, T).....	49
Figure II.19: Diagramme fonctionnement du rapport cyclique (D)avec (t).....	49
Figure II.20: Diagramme fonctionnement du système PV (Vch, T)	50
Figure III.1: Système photovoltaïque avec batteries de stockage	53
Figure III.2: convertisseur Buck-Boost bidirectionnel avec deux commutateurs.....	54
Figure III.3: Circuits équivalents de Buck-Boost, (A) : Boost mode, (B) : Buck mode.	55
Figure III.4: Le Schéma électrique de batterie.....	57
Figure III.5: La variation de Vco en fonction de l'état de charge (SOC).....	58
Figure III.6: Principe de la régulation du bus continu.....	60
Figure III.7: Organigramme de l'algorithme de gestion de puissance du système Photovoltaïque	61
Figure III.8 : Résultats de la simulation.....	63
Figure IV.1: Schéma explicatif du banc d'essai expérimental du système PV	67
Figure IV.2: Les différents éléments constituant le banc expérimental du système photovoltaïque	68
Figure IV.3: Caractéristiques du module (PV) IS-150 C/12.....	69
Figure IV.4: différentes parties de la carte Dspace1104 : A) Boîtier CP 1104 avec ruban maître connecté, B) carte de commande DS1104	70
Figure IV.5: Blocs de Master PPC	70
Figure IV.6: Les blocs dSPACE dans Simulink/Matlab.....	71
Figure IV.7: Le capteur de tension LV25	71
Figure IV.8: Capteur de courant LA55-P	72
Figure IV.9: La carte de Convertisseur Boost et son commande.....	72
Figure IV.10: La carte de Convertisseur Buck-Boost et son carte de commande.....	73
Figure IV.11: Les charges résistives.....	73
Figure IV.12: batteries AGM (GP100-12).....	73

Figure IV.13: Caractéristiques de (puissance, courant, tension) du générateur PV, tension du bus continu, et courant de charge lors de l'implémentation de l'algorithme P&O	74
Figure IV.14: Allures de (puissance, courant, tension) du Générateur PV, tension de bus continu, le rapport cyclique et courant de la charge avec variations des conditions climatiques (T, R) et l'absence de régulation de la tension de bus continu.	75
Figure IV.15: Caractéristiques de (puissance, courant, tension) du générateur PV, tension du bus continu, courant de la batterie et courant de charge avec variations des conditions climatiques (T, R) et la présence de régulation de la tension du bus continu.	76
Figure IV.16: Caractéristiques de (puissance, courant, tension) du générateur PV, tension du bus continu, courant de la batterie et courant de charge avec variations de l'impédance de la charge et la présence de régulation de la tension du bus continu.	77
Figure IV.17: Caractéristiques de (puissance, courant, tension) du générateur PV, tension du bus continu, courant de la batterie avec la présence de la boucle de gestion de puissance.	78

Liste des tableaux

Tableau I.1: Les types de batterie électrochimiques (Avantage et Inconvénient).....	21
Tableau I.2: Performances des différentes technologies des cellules photovoltaïques	24
Tableau II.1: Caractéristiques du module IS-150 C/12.	35
Tableau III.1: Caractéristiques de la batterie	59
Tableau IV.1: Caractéristiques du module IS-150 C/12.	69

Liste des abréviations

SMES : Stockage d'énergie magnétique dans des bobinages supraconducteurs

CdTe : cellule photovoltaïque de cadmium

MPPT : Maximum Power Point Tracker

PV : photovoltaïques

I_{ph} : représente le photo-courant

I_0 : courant de saturation

R_s : la résistance série de la cellule

R_p : la résistance parallèle de la cellule

α : le facteur d'idéalité de la diode

V_t : la tension thermique.

I_{sc} : le courant de court-circuit

K_i : le coefficient de température de court-circuit

K_v : le coefficient de température en circuit ouvert

V_{oc} : La tension en circuit ouvert

G : L'irradiance solaire

N_{pp} et N_{ss} : le nombre de module en parallèle et en série

R_s : la résistance série

R_{sh} : la résistance shunt

V_{opt} : tension optimaux

I_{opt} : courant optimaux

F : Facteur de forme

P_{max} : la puissance maximale

W_c : Watt crête

W_p : Watt peak

η : le rendement

S : la surface du générateur

AM : Air Mass

GPV : générateur photovoltaïque

PPM : point de puissance maximale

Liste des abréviations

L : l'inductance

D1 : la diode

Z : la charge

DTs : la première période de Boost

P&O : La méthode (Perturbation et observation)

D : rapport cyclique

DC : courant continu

AC : courant alternatif

Bus CC : bus courant continu

Q1 et Q2: la commande des interrupteurs Buck-Boost

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

N_a : *Le nombre de jours d'autonomie.*

V_a : La tension du système.

DOD : Le profondeur de décharge

P_{incid} : Puissance du générateur

PI : un contrôleur utilisé basé sur une fonction de transfert du bus continu

$V_{dc\ ref}$: une valeur de référence du bus continu

IL : courant de l'inductance

SOC : state of charge

LMPP : mode MPP Limité

RTW : Real-Time Workshop

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie est essentielle dans la vie quotidienne de chacun. Parmi les différentes formes d'énergie, l'électricité occupe une place primordiale. Elle est produite de diverses manières à partir de différentes sources d'énergie. Les centrales thermiques conventionnelles (utilisant des combustibles fossiles ou l'énergie nucléaire), les centrales hydroélectriques et d'autres unités de production d'électricité alternatives (comme les éoliennes, les panneaux photovoltaïques, les piles à combustible, les centrales à biomasse, les centrales géothermiques, etc.) sont toutes des sources de production d'électricité. Bien que le coût de l'électricité produite par l'énergie éolienne, l'énergie solaire photovoltaïque et les piles à combustible reste élevé, grâce à la recherche, au développement et à l'utilisation croissante de ces technologies dans le monde, les coûts devraient diminuer dans les années à venir. Ainsi, ces sources d'énergie sont susceptibles de devenir aussi bénéfiques que les autres producteurs d'électricité.

Il est crucial d'adapter la puissance entre l'alimentation et la charge pour assurer un fonctionnement optimal et garantir la fiabilité du système. Grâce aux avancées de l'électronique de puissance appliquée aux applications photovoltaïques, de nombreux systèmes de conversion innovants ont été développés. Cela inclut l'utilisation de transformateurs équipés d'étages d'adaptation d'entrée pour maximiser la recherche du point de puissance maximale (PPM). Ces dispositifs permettent d'adapter et d'optimiser la production photovoltaïque en utilisant des convertisseurs DC/DC placés entre les modules photovoltaïques et les entrées de l'onduleur.

Les convertisseurs DC/DC, tels que les hacheurs, sont utilisés pour maximiser l'extraction de puissance des panneaux photovoltaïques en contrôlant le point de puissance maximale (MPPT), ainsi que pour ajuster le niveau de tension du générateur photovoltaïque à celui du bus CC.

Le stockage de l'énergie électrique revêt une grande importance car il permet de pallier l'intermittence et la variabilité des sources d'énergies renouvelables, telles que l'énergie solaire et éolienne. Les systèmes de stockage capturent l'électricité générée lorsque la demande est faible ou que les ressources sont abondantes, et la libèrent lorsque la demande est élevée ou que les ressources sont limitées. Cela permet de garantir la stabilité et la fiabilité du réseau électrique, tout en optimisant l'utilisation des énergies renouvelables.

Dans le premier chapitre, présentation d'un aperçu des différents types d'énergie, qu'ils soient renouvelables ou non, ainsi que de leurs sources. Nous aborderons également les problématiques du stockage de l'énergie électrique et les solutions utilisées, en mettant l'accent sur l'énergie photovoltaïque, ses avantages, ses inconvénients et les composants essentiels pour améliorer la production d'énergie électrique.

Le deuxième chapitre se concentre sur la modélisation des cellules photovoltaïques et des convertisseurs DC/DC Boost, ainsi que sur l'algorithme de suivi du point de puissance maximale (MPPT). Nous sélectionnerons l'algorithme adéquat pour intégrer dans le logiciel MATLAB-SIMULINK.

Dans le troisième chapitre, présentation de soumettre la modélisation du convertisseur DC/DC Buck-Boost, en intégrant le stockage d'énergie. Nous choisirons la batterie adaptée à son fonctionnement et le convertisseur DC comme porteur de courant continu. Nous essaierons d'améliorer le fonctionnement du système photovoltaïque en ajoutant un facteur de protection en cas de saturation de la batterie.

Enfin, dans le chapitre final, nous exposerons les travaux expérimentaux réalisés en vue de mettre en place un système de production d'énergie photovoltaïque. Nous étudierons les résultats obtenus et analyserons la relation entre les composants utilisés, en veillant à assurer la continuité et la gestion efficace de la production d'énergie photovoltaïque.

Chapitre I: État de l'Art sur différentes technologies du système de stockage

I.1 Introduction

La recherche se concentre actuellement sur le développement de technologies de stockage d'énergie efficaces et abordables pour l'énergie électrique produite à partir de sources renouvelables. L'objectif est de pouvoir stocker de grandes quantités d'énergie à faible coût et de la libérer selon les besoins. Différentes technologies de stockage sont explorées, notamment les batteries au lithium-ion, les systèmes de stockage d'hydrogène, les volants d'inertie et les supercondensateurs.

Dans ce chapitre, nous aborderons les différents types d'énergie, à la fois renouvelables et non renouvelables, ainsi que leurs sources. Nous discuterons également des défis liés au stockage de l'énergie électrique, en mettant l'accent sur les solutions utilisées dans le contexte des énergies renouvelables. En particulier, nous examinerons l'énergie photovoltaïque, en discutant de ses avantages et inconvénients, ainsi que des composants essentiels nécessaires pour optimiser la production d'énergie électrique.

I.2 Les différentes ressources d'énergie :

L'énergie joue un rôle crucial dans le développement et l'évolution des sociétés humaines, tant en améliorant les conditions de vie que en favorisant le développement des activités industrielles. L'énergie est ce qui nous permet d'accomplir du travail et de faire fonctionner des machines. Nous disposons de nombreuses sources d'énergie, telles que le pétrole, le charbon, le gaz, le nucléaire, le solaire, l'eau, l'éolien, la biomasse, etc.

Ces sources d'énergie peuvent être divisées en deux catégories distinctes :

- Les énergies fossiles, qui proviennent de matières premières non renouvelables.
- Les énergies renouvelables, qui exploitent des phénomènes naturels pour produire de l'énergie.

I.2.1 Les énergies fossiles :

Les énergies fossiles, telles que le charbon, le pétrole et le gaz naturel, ont été largement utilisées comme sources d'énergie pendant des années. Cependant, elles ont plusieurs inconvénients majeurs : émissions de gaz à effet de serre, pollution de l'air, impact environnemental de l'extraction, épuisement des ressources et volatilité des prix. Pour surmonter ces problèmes, il existe une tendance croissante à adopter des sources d'énergie plus

propres et renouvelables, avec des efforts importants pour développer des technologies propres et réduire notre dépendance aux énergies fossiles.

La transition vers des sources d'énergie plus propres représente un défi majeur pour notre société, mais elle est essentielle pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, lutter contre le changement climatique et préserver notre planète pour les générations futures.

I.2.1.1 Les Inconvénients des énergies fossiles :

Les énergies fossiles, notamment le charbon, le pétrole et le gaz naturel, ont été largement utilisées comme sources d'énergie pendant de nombreuses années. Cependant, elles présentent plusieurs inconvénients importants:

1. Émissions de gaz à effet de serre : Les énergies fossiles sont responsables de la majeure partie des émissions de gaz à effet de serre, contribuant ainsi au changement climatique. Lorsqu'elles sont brûlées, elles libèrent du dioxyde de carbone dans l'atmosphère, ce qui entraîne l'accumulation de chaleur et l'augmentation de la température de la planète.

2. Pollution de l'air : La combustion des énergies fossiles génère également des particules fines et d'autres polluants qui polluent l'air. Ces polluants ont des effets néfastes sur la santé humaine, en particulier sur les voies respiratoires.

3. Impact environnemental de l'extraction : L'extraction des énergies fossiles peut avoir un impact significatif sur l'environnement. Elle peut entraîner la destruction de paysages naturels, la déforestation, la fragmentation des habitats, ainsi que la contamination des sols et des eaux.

4. Épuisement des ressources : Les énergies fossiles sont des ressources non renouvelables, ce qui signifie qu'elles finiront par s'épuiser. De plus, l'extraction de ces ressources devient de plus en plus difficile et coûteuse à mesure que les gisements facilement accessibles sont épuisés.

5. Volatilité des prix : Les prix des énergies fossiles sont souvent soumis à des fluctuations importantes en raison de facteurs tels que l'offre et la demande, les tensions géopolitiques et les catastrophes naturelles. Cette volatilité peut avoir un impact sur l'économie mondiale.

I.2.2. Les Energies renouvelables :

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie qui se renouvellent naturellement à un rythme suffisamment rapide pour être considérées comme inépuisables à l'échelle de notre temps humain. Le terme "énergie renouvelable" est une expression courante qui englobe les

concepts de "sources d'énergie renouvelables" ou "énergie d'origine renouvelable", qui sont des termes plus précis d'un point de vue physique. [1].

I.2.2.1 Les différents types d'énergies renouvelables

- **Énergie éolienne** : L'énergie éolienne est une forme d'énergie renouvelable qui provient de la force du vent, utilisée pour convertir en électricité à l'aide de dispositifs tels que les éoliennes ou les moulins à vent.

- **Biomasse** : La biomasse énergie désigne la partie de la biomasse utilisée comme source d'énergie, soit par combustion directe (comme le bois énergie), soit après méthanisation (biogaz) ou transformation chimique (agro carburant).

- **Énergie géothermique** : L'énergie géothermique est obtenue en extrayant la chaleur naturelle emmagasinée dans les roches terrestres, et elle est utilisée pour le chauffage ou la génération d'électricité en exploitant la chaleur présente dans le sol.

- **Énergie solaire** : L'énergie solaire est l'énergie thermique et lumineuse provenant du rayonnement solaire qui atteint la surface de la Terre après avoir traversé l'atmosphère.

- **Énergie solaire thermique** : L'énergie solaire thermique utilise la chaleur du rayonnement solaire pour chauffer un fluide, qui peut ensuite être utilisé directement (pour l'eau chaude, le chauffage, etc.) ou indirectement (pour produire de l'électricité).

- **Énergie hydraulique** : L'énergie hydraulique est produite par le mouvement de l'eau, que ce soit les chutes d'eau, les cours d'eau, les courants marins, les marées ou les vagues. Elle peut être utilisée directement, comme avec les moulins à eau, ou convertie en électricité dans les centrales hydroélectriques.

- **Énergie marémotrice** : L'énergie marémotrice exploite l'énergie des marées pour produire de l'électricité. Des turbines immergées sont placées dans des zones de forts courants de marée pour générer cette énergie renouvelable.

I.3. L'évolution du mix électrique mondial

En 2022, la demande mondiale d'électricité a augmenté de 2,5% par rapport à l'année précédente, ce chiffre étant similaire à la croissance moyenne observée au cours de la dernière décennie (+2,6% par an entre 2010 et 2021). [2]

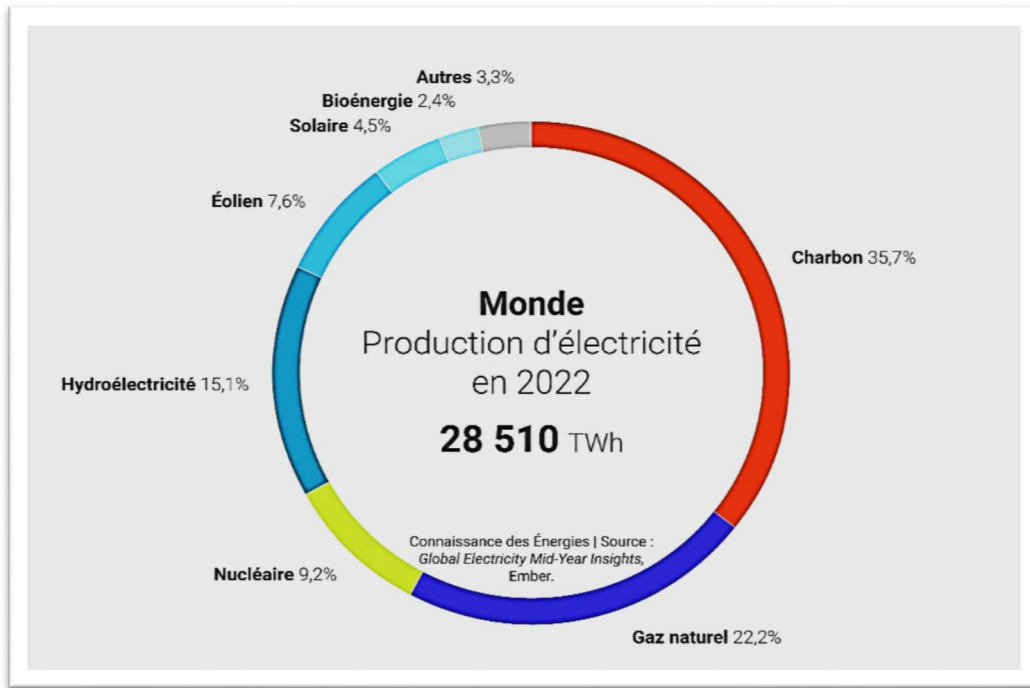


Figure I.1: L'évolution du mix électrique mondial en 2022 [2]

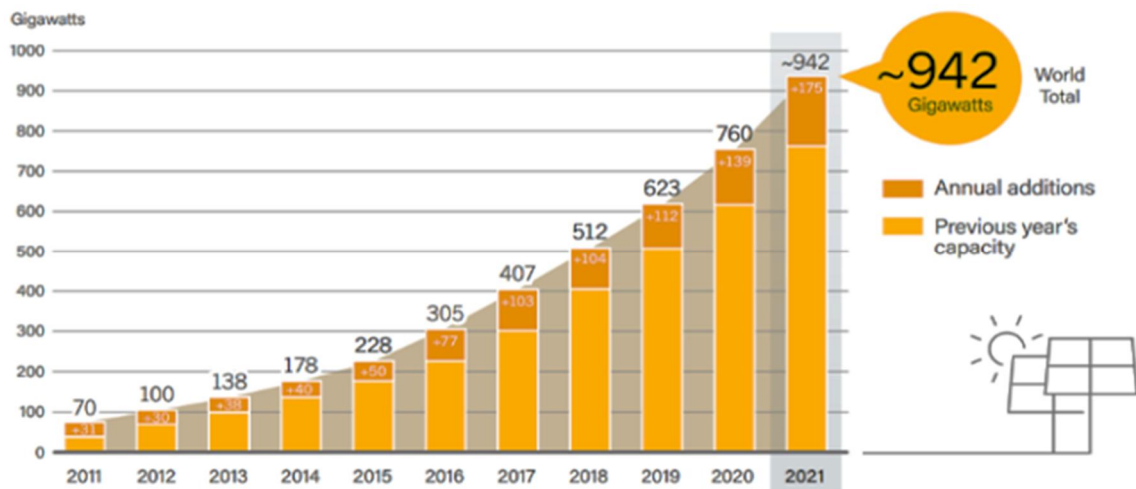


Figure I.2: Capacité annuelle d'énergie (PV) installée dans le monde, 2011-2021. [3]

Les marchés tels que le Japon, l'Inde, la Chine et les États-Unis ont adopté massivement les systèmes solaires photovoltaïques en tant que principale source d'énergie propre. En 2021, la capacité mondiale de l'énergie solaire photovoltaïque a augmenté d'environ 175 GW, portant la capacité totale mondiale à 942 GW. [3]

I.3.1 L'état des énergies renouvelables en Algérie

L'Algérie a pour ambition de jouer un rôle majeur dans la production d'électricité à partir de sources d'énergie renouvelables, en mettant un fort accent sur les technologies photovoltaïques et éoliennes. Le pays prévoit également d'explorer les opportunités offertes par la biomasse, la cogénération, la géothermie et l'énergie solaire thermique, cette dernière étant intégrée à partir de 2021. L'objectif à atteindre d'ici 2030 est d'avoir une capacité installée en énergies renouvelables représentant 37% et une production d'électricité d'origine renouvelable couvrant 27% de la consommation nationale.

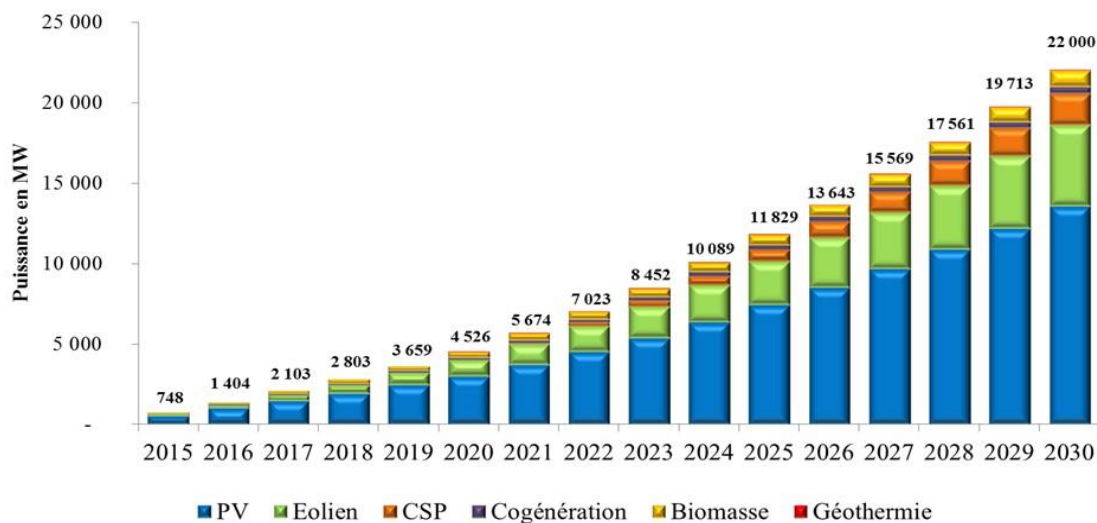


Figure I.3: L'état de l'énergie renouvelable au niveau l'Algérie.[4]

Dans la période allant de 2021 à 2030, l'Algérie prévoit de développer une interconnexion électrique entre le Nord et le Sahara, notamment dans les régions d'In Salah, Adrar, Timimoune et Bechar. Cela permettra l'installation de grandes centrales d'énergies renouvelables et leur intégration dans le système énergétique national. Cette initiative ouvrira des opportunités pour l'utilisation économiquement viable de l'énergie solaire thermique.

L'Algérie possède un potentiel élevé en matière d'énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire et l'énergie éolienne. Le gouvernement a adopté une stratégie visant à augmenter la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique du pays. Des projets solaires et éoliens ont été développés, mais des défis subsistent en termes de financement et de renforcement des capacités techniques pour exploiter pleinement ce potentiel.

Néanmoins, l'Algérie est en bonne voie pour accroître sa production d'énergie renouvelable dans les années à venir [4].

I.4. Les défis liés à l'intégration des sources d'énergie renouvelables.

Les défis de l'intégration des énergies renouvelables : intermittence de la production, stockage de l'énergie, renforcement des réseaux électriques, planification du système électrique, coûts et rentabilité, acceptation sociale et réglementation.

I.4.1. L'intermittence

L'intermittence de la production d'électricité renouvelable est un défi majeur à prendre en compte dans l'intégration des sources d'énergie renouvelables. Les énergies éolienne et solaire, par exemple, sont sujettes à des fluctuations en raison de facteurs tels que les conditions météorologiques et l'heure du jour. Cela rend la prévision de la production d'énergie renouvelable difficile et crée des défis pour l'équilibrage de l'offre et de la demande d'électricité.

Pour pallier cette intermittence, il est essentiel de développer des méthodes de prévision précises pour estimer la production future des sources d'énergie renouvelable. Cela permet de mieux planifier l'exploitation du réseau électrique et de prendre des mesures pour ajuster la production ou la demande en conséquence.

Les avancées dans les technologies de prévision, telles que l'utilisation de modèles météorologiques avancés et d'algorithmes d'apprentissage automatique, contribuent à améliorer la fiabilité des prévisions de production d'énergie renouvelable. De plus, l'intégration de sources diverses et complémentaires, comme l'énergie solaire et l'énergie éolienne, peut atténuer l'impact de l'intermittence en compensant les fluctuations de production.

L'intermittence de la production d'énergie renouvelable constitue un défi majeur dans son intégration au réseau électrique. Cependant, grâce à des prévisions précises et à une planification adéquate, il est possible de gérer efficacement ces fluctuations et d'optimiser l'utilisation des sources d'énergie renouvelable.

I.5. Analyse des défis et des interrogations sur la continuité de l'approvisionnement et le stockage de l'énergie.

La question posée concerne la garantie d'une alimentation énergétique ininterrompue, qui peut être compromise par divers facteurs tels que les catastrophes naturelles, les tensions géopolitiques, les fluctuations des prix des matières premières ou les défaillances techniques.

Quelques réflexions sur les défis et les questions concernant la continuité de l'approvisionnement et le stockage d'énergie :

1. Diversification des sources d'énergie : La diversification des sources d'énergie, y compris les énergies renouvelables, peut garantir une continuité de l'approvisionnement en évitant une dépendance excessive à une seule source.

2. Résilience des infrastructures : Les infrastructures énergétiques doivent être résilientes face aux catastrophes naturelles, aux cyberattaques et aux défaillances techniques pour assurer une fourniture stable.

3. Stockage de l'énergie : Le développement de technologies de stockage de l'énergie efficaces et abordables peut compenser les fluctuations de la demande et de l'approvisionnement.

4. Coopération internationale : La coopération internationale dans le domaine de l'énergie peut contribuer à diversifier les sources d'approvisionnement et à renforcer la sécurité énergétique.

5. Planification et gestion de la demande : Une planification et une gestion efficaces de la demande énergétique, ainsi que l'encouragement de l'efficacité énergétique, peuvent réduire les pressions sur l'approvisionnement et prévenir les pénuries.

Il est important de noter que chaque pays et chaque situation peuvent présenter des défis spécifiques, nécessitant des approches adaptées pour garantir un approvisionnement énergétique ininterrompu.

I. 6. Le Système de stockage d'énergie :

Le stockage d'énergie est une solution complète et intégrée, bien qu'il puisse encore manquer de maturité, il présente de nombreux avantages [5].

Il permet de réaliser des gains environnementaux en favorisant le déploiement à grande échelle des énergies décarbonnées et en facilitant la transition depuis les centrales thermiques.

Il offre la flexibilité nécessaire pour répondre aux contraintes locales ou globales, que ce soit de manière centralisée ou décentralisée.

Il assure une indépendance vis-à-vis des ressources fossiles, ce qui se traduit par des avantages économiques à long terme compte tenu de l'augmentation prévisible des prix de ces ressources et du coût du dioxyde de carbone.

Dans le contexte des installations photovoltaïques, le stockage permet de conserver l'énergie produite par le générateur photovoltaïque pour une utilisation ultérieure.

La gestion de l'énergie solaire nécessite la prise en compte de solutions de stockage en fonction des conditions météorologiques.

Le stockage de l'énergie électrique implique généralement l'utilisation d'une forme d'énergie intermédiaire, telle que l'énergie gravitationnelle, compressive, électrochimique, électrostatique, électromagnétique, cinétique, thermique, etc., qui peut ensuite être convertie en électricité. Il existe deux types de stockage à considérer : [6].

-Le stockage à court terme désigne la capacité de stocker de l'énergie pour des périodes inférieures à 10 minutes.

-Le stockage à long terme, quant à lui, concerne la capacité de stocker de l'énergie pour des périodes supérieures à 10 minutes.

I.6.1 Exposition des différentes technologies de stockage :

La section actuelle offre une présentation précieuse de chaque technologie de stockage stationnaire existante ou en développement, en mettant en évidence les avantages et les inconvénients de chacune d'entre elles.

I.6.1.1 Techniques de stockage à court terme :

Les techniques de stockage d'énergie électrique à court terme sont utilisées pour stocker de l'énergie de manière temporaire et la libérer rapidement selon les besoins.

➤ Stockage d'énergie magnétique dans des bobinages supraconducteurs (SMES) :

Les bobines supraconductrices permettent de stocker de l'énergie en utilisant un champ magnétique créé par un courant électrique. Pour maintenir la supraconductivité de la bobine, elle est refroidie à l'aide d'hélium liquide. L'énergie est stockée dans la bobine sous la forme d'une fonction de l'inductance et du courant qui la traverse. Pour récupérer l'énergie, le circuit est ouvert et connecté au récepteur, permettant ainsi un transfert rapide de l'énergie stockée. Cependant, les coûts de fabrication et d'entretien sont élevés, ce qui limite la présence de petites et moyennes entreprises dans ce domaine. Actuellement, les systèmes disponibles ont une capacité de 1 à 10 MW, bien que la recherche explore des applications de plus grande envergure allant jusqu'à 100 MW pour les PME. [7]

Avantages:

- ✓ Temps de réponse excellent
- ✓ Rendement élevé
- ✓ Convient pour fournir de l'énergie rapidement
- ✓ Durée d'utilisation
- ✓ Charge décharge rapidement

Inconvénients:

- Faible densité énergétique
- Processus cryogénique nécessaire (pénalise par conséquent le bilan énergétique)
- Autodécharge
- Ondes électromagnétiques

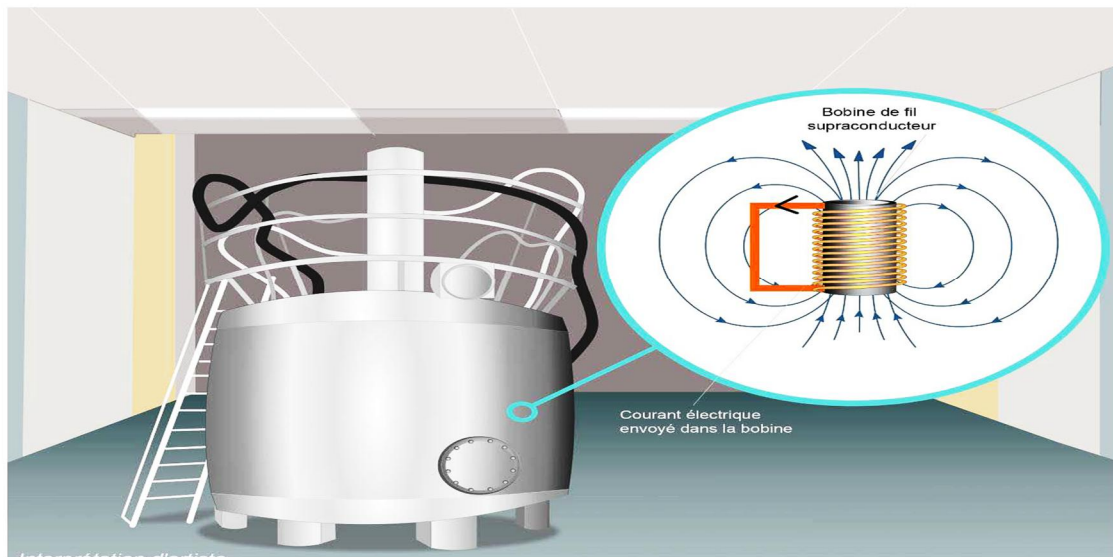


Figure I.4: Conception du système de Stockage (Super Magnetic Energy Storage) (SMES)

➤ **Stockage par condensateurs à double couche : (super condensateurs)**

Les supercondensateurs fonctionnent en exploitant la formation d'une double couche électrochimique entre un électrolyte (solution ionique) et une électrode conductrice, ce qui permet l'accumulation de charges électriques. Contrairement aux batteries, les supercondensateurs ne subissent pas de réactions d'oxydation et de réduction. Ces dispositifs de stockage sont utilisés dans certaines installations électriques pour améliorer la qualité de l'énergie. Cependant, leur adoption à grande échelle est encore limitée, et des efforts supplémentaires sont nécessaires pour leur développement et leur application généralisée. [7]

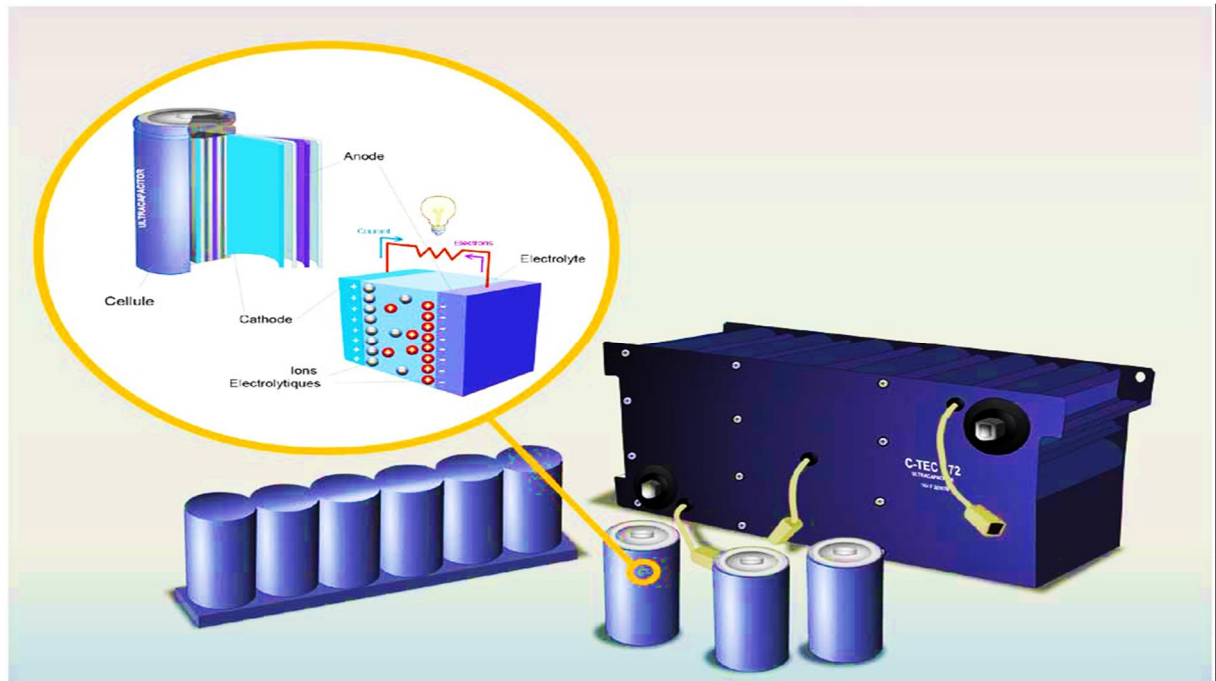


Figure I.5: Stockage par condensateurs à double couche (super condensateurs)

➤ **Stockage sous forme d'énergie cinétique (volant d'inertie) :**

Historiquement utilisé dans la régulation des machines à vapeur, le concept du volant d'inertie est désormais appliqué au stockage temporaire de l'énergie sous forme de rotation mécanique.

Un volant d'inertie se compose d'un bloc en fibre de carbone, sous forme d'anneau ou de tube, qui est entraîné par un moteur électrique. [7]

Avantages :

- ✓ Temps de réponse très court
- ✓ Très bon rendement et longue durée de vie
- ✓ Peu de maintenance
- ✓ Nombreux constructeurs

Inconvénients :

- Autodécharge élevée
- Préoccupations en matière de sécurité.
- Le Coût



Figure I.6: Stockage par volant d'inertie [7]

I.6.1.2 Techniques de stockage à long terme :

Les techniques de stockage d'énergie électrique à long terme jouent un rôle crucial dans la gestion efficace des ressources énergétiques et facilitent l'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux électriques. Elles permettent de stocker l'énergie pendant les périodes de faible demande et de la libérer lorsque la demande est plus élevée.

➤ Stockage sous forme gravitaire (pompage) :

Le principe du stockage d'énergie par pompage hydraulique consiste à utiliser deux réservoirs d'eau situés à des hauteurs différentes. Pendant les périodes de faible consommation électrique, lorsque la demande (le coût) est plus bas, de l'eau est pompée vers le réservoir supérieur. Lors des périodes de forte demande, l'eau est relâchée du réservoir supérieur vers le réservoir inférieur, en passant par des turbines qui entraînent des alternateurs pour produire de l'électricité. Cette technologie de stockage à grande échelle est l'une des plus populaires en raison de son faible coût d'investissement. Cependant, elle nécessite des sites appropriés, ce qui devient de plus en plus difficile à trouver. Des concepts de nouvelles centrales de pompage sont envisagés, notamment en utilisant l'environnement marin (centrale de pompage en mer), où le réservoir inférieur serait représenté par la mer et le réservoir supérieur serait situé sur la côte.

Avantages : [7]

- ✓ Offrent un rendement élevé et une durée de vie prolongée de plus de 40 ans

Inconvénients :

- La localisation, les conséquences sur l'environnement et l'acceptation publique constituent des contraintes importantes.

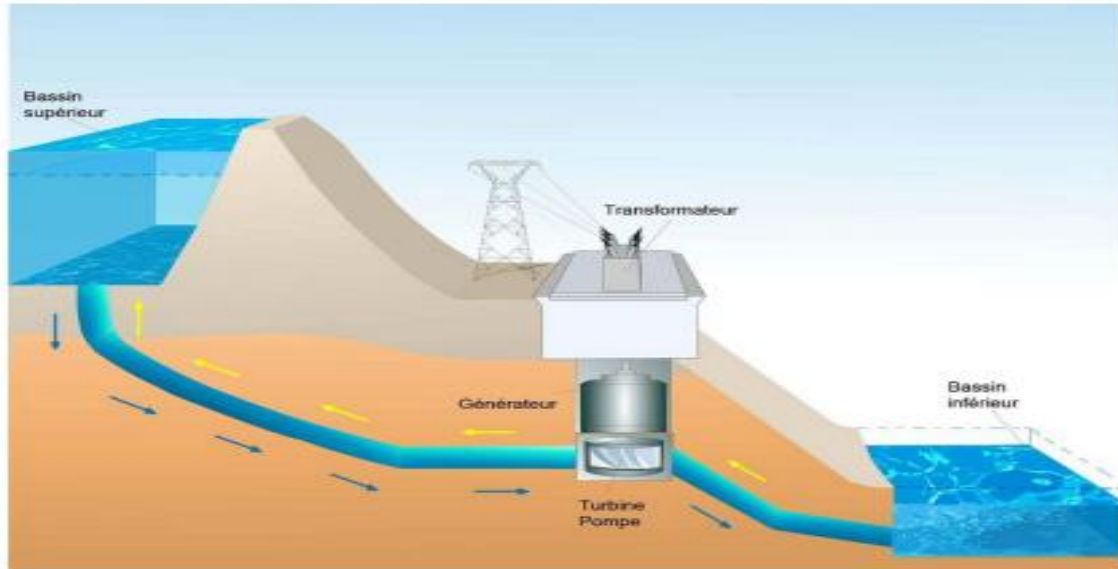


Figure I.7: Stockage par gravitaire(pompage) hydraulique

➤ **Stockage d'énergie par air comprimé (pression) :**

Les installations de stockage d'énergie par air comprimé de grande capacité utilisent l'électricité à faible coût pendant les périodes de faible demande pour comprimer de l'air et le stocker dans des cavités souterraines, telles qu'une ancienne mine de sel ou une caverne de stockage de gaz naturel. Lorsque la demande en électricité est élevée, l'air comprimé est libéré pour alimenter des turbines qui produisent de l'électricité. Ce système permet de stocker de l'énergie à grande échelle et de la libérer lorsque nécessaire, contribuant ainsi à l'équilibre du réseau électrique et à la fourniture d'une énergie fiable. [7]

Avantages :

- ✓ Aucune émission de CO₂ (CAES adiabatique)
- ✓ Haute puissance et grande capacité

Inconvénients :

- Le coût d'investissement
- Stockage géologique adaptatif

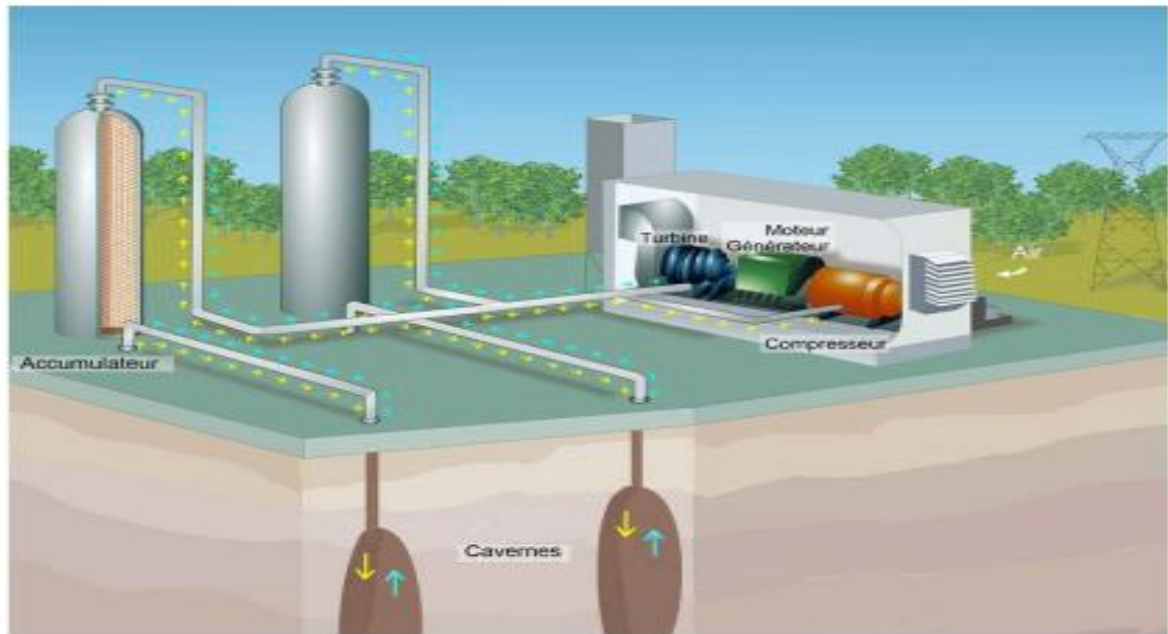


Figure I.8: Stockage à air comprimé en caverne

➤ **Stockage sous forme thermique (chaleur et froid) :**

Le stockage de chaleur a été utilisé depuis longtemps, par exemple en plaçant une pierre près d'un feu pour profiter de sa chaleur progressive. Ce concept est également appliqué dans des dispositifs tels que les ballons d'eau chaude. Dans une centrale thermodynamique, la chaleur captée pendant les journées ensoleillées est stockée dans des réservoirs de sels fondus. Lorsque le soleil se couche, la chaleur est transférée à un fluide caloporteur à haute température, qui entraîne une turbine pour produire de l'électricité. [7]

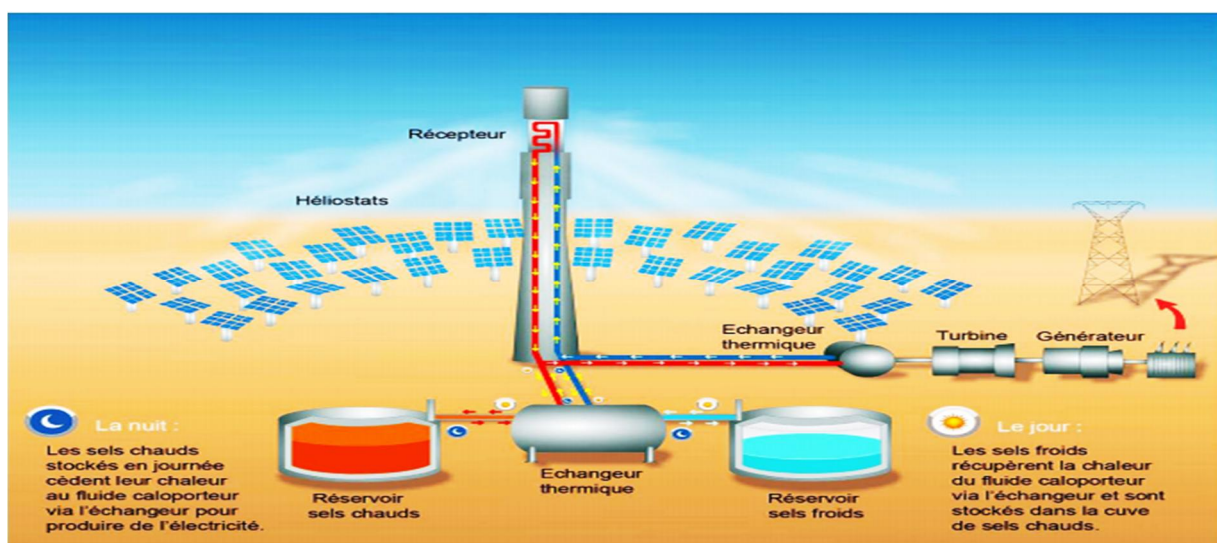


Figure I.9: Principe de fonctionnement d'un stockage thermique. [8]

➤ **Stockage thermochimique couplé à un système solaire thermique :**

Le concept de stockage d'énergie thermique saisonnière repose sur l'utilisation d'un réactif, tel que le bromure de strontium dans les systèmes résidentiels, qui est stocké dans un réservoir. Pendant l'été, l'eau chaude sanitaire produite par le système solaire combiné transfère sa chaleur à l'air extérieur via un échangeur eau-air. Cet air chaud assèche le réactif, qui peut être conservé au sec pendant plusieurs mois. Pendant l'hiver, le processus est inversé. L'air extérieur froid et humide circule à travers le réactif, qui se réhydrate et génère de la chaleur grâce à une réaction chimique exothermique. L'air réchauffé, atteignant environ 70°C, est ensuite dirigé vers un échangeur de chaleur pour transférer sa chaleur à l'eau qui circule vers le réservoir, permettant ainsi une utilisation pour l'eau sanitaire. Ce système permet de stocker de la chaleur pendant les mois d'été et de la libérer pendant les mois d'hiver, offrant ainsi une solution de stockage d'énergie thermique saisonnière. [8]



Figure I.10: Stockage thermochimique couplé à un système solaire

➤ **(Électrochimique) d'énergie grâce à l'hydrogène :**

Les systèmes de stockage d'énergie à l'hydrogène utilisent un électrolyseur pour séparer l'eau en oxygène et en hydrogène pendant les périodes de faible consommation d'électricité. L'hydrogène ainsi produit peut-être stocker sous forme comprimée, liquéfiée ou dans des hydrures métalliques. Lorsqu'il est temps de réinjecter de l'électricité dans le réseau, il existe trois méthodes principales :

- La première méthode consiste à alimenter une pile à combustible qui convertit l'hydrogène en électricité directement.

- La deuxième méthode consiste à utiliser l'hydrogène pour synthétiser du gaz naturel par méthanisation. Ce gaz naturel de synthèse peut être injecté directement dans le réseau de gaz existant ou utilisé pour produire de l'électricité dans une centrale à gaz traditionnelle.

- La troisième méthode consiste à utiliser l'hydrogène dans une centrale à gaz spécialement conçue pour produire de l'électricité.

- Ces différentes approches permettent de stocker l'énergie sous forme d'hydrogène et de la convertir de nouveau en électricité selon les besoins, offrant ainsi une solution de stockage d'énergie électrochimique grâce à l'hydrogène. [7]

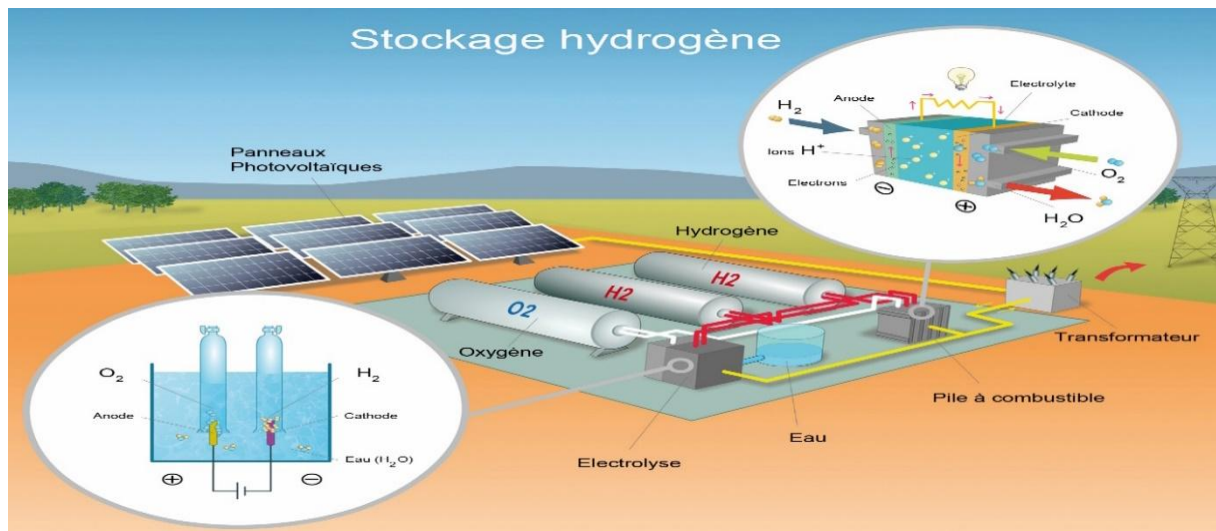


Figure I.11: Stockage d'énergie grâce à l'hydrogène. [7]

➤ **Stockage (électrochimique) avec des batteries à circulation :**

Les systèmes de stockage de batterie à circulation utilisent deux électrolytes liquides contenant des ions métalliques, tels que le zinc/brome, le poly bromure de sodium/polysulfure, ou les couples d'ions métalliques vanadium/vanadium. Ces électrolytes circulent à travers des électrodes séparées par une membrane échangeuse de protons. Les charges électriques sont échangées entre les électrodes pour produire ou absorber de l'électricité. La puissance produite ou absorbée est déterminée par la taille de la membrane et des électrodes, tandis que l'énergie stockée dépend du volume des électrolytes. À l'heure actuelle, seuls des projets expérimentaux sont en cours de développement pour cette technologie de stockage de batterie à circulation. [9]

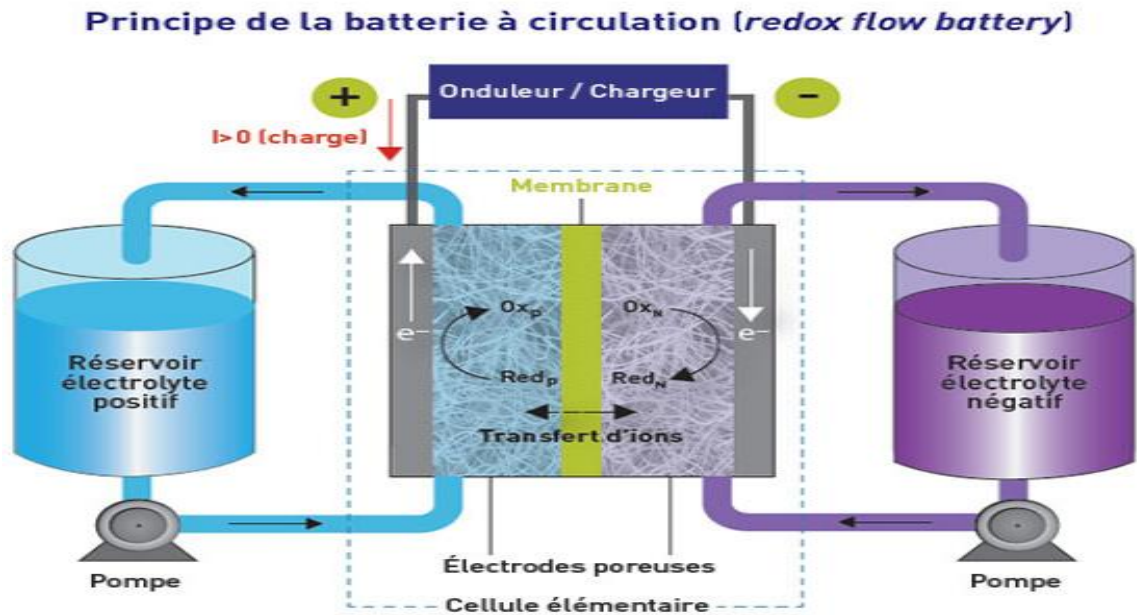


Figure I.12: Schéma et principe fonctionnement d'une batterie à circulation Source. [9]

➤ **Stockage avec des Batteries électrochimiques :**

Les batteries sont des dispositifs réversibles qui utilisent des réactions électrochimiques pour stocker de l'énergie électrique sous forme chimique et la restituer lorsque nécessaire. Contrairement aux cellules solaires, qui ne subissent qu'un transfert d'électrons sans "usure" significative, les batteries électrochimiques impliquent un transfert de matière entre l'électrolyte et les électrodes, ce qui entraîne une "usure essentielle" qui limite leur durée de vie. Les batteries sont couramment utilisées pour le stockage d'énergie à petite et moyenne échelle, offrant une solution fiable et portable pour répondre aux besoins en électricité dans diverses applications. [7]

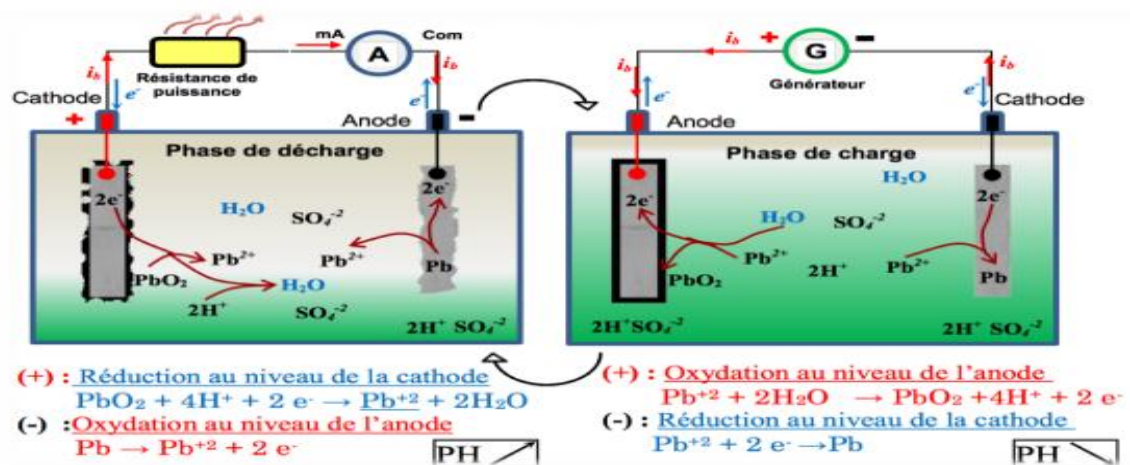


Figure I.13: La Décharge et charge d'un accumulateur

Tableau I.1: Les types de batterie électrochimiques (Avantage et Inconvénient) [7]

Le Type	Avantage	Inconvénient
Batterie à décharge lente	<ul style="list-style-type: none"> - Durée de vie (5 à 10 ans) - Tarif correct - Bonne tenue à la surchauffe, inertie thermique élevée - Beaucoup de charge de cycle (entre 500 et 1000 cycles) 	<ul style="list-style-type: none"> - Rechargez ces batteries avec de l'eau distillée régulièrement - poids lourds - Froid sensible
Batterie Gel	<ul style="list-style-type: none"> - Longévité (8 à 12 ans) - Aucun entretien - Bonne tolérance aux hautes températures - Charge de cycles nombreux (entre 500 et 1200 cycles) 	<ul style="list-style-type: none"> - Cher - Lourd (poids) - Inadapté aux courants de charge/décharge élevés
Batterie Lithium-ion	<ul style="list-style-type: none"> - Longévité (30 ans) - Poids léger - Aucun entretien - faible auto-décharge - Bonne tolérance aux basses et hautes températures. - Charge cyclique très importante (entre 2500 et 5000 cycles) 	<ul style="list-style-type: none"> - Très onéreuse

I.7 Critères de choix d'une technologie de stockage :

Il existe différentes technologies de stockage stationnaire, chacune pouvant être adaptée en fonction des besoins et des contraintes du système de production d'électricité et des considérations financières. Ces différentes technologies de stockage sont complémentaires et doivent être envisagées dans le cadre d'un réseau de stockage global. Le choix de la technologie de stockage dépendra des besoins spécifiques, des exigences réglementaires, des coûts et de l'impact environnemental associés. Il est important de prendre en compte tous ces facteurs lors de la sélection de la technologie de stockage appropriée. [10]

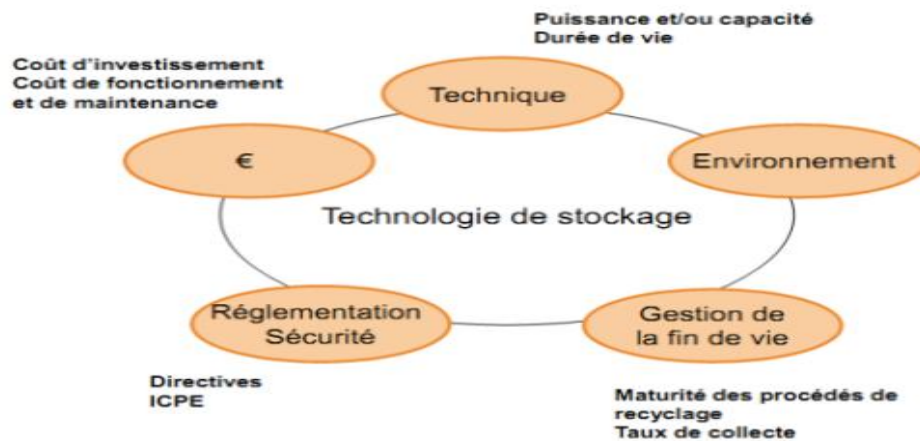


Figure I.14: Critères pour choisir une technologie de stockage d'énergie. [7]

- ✓ Le choix d'un système de stockage sur un site donné dépend de plusieurs critères de choix.
- ✓ La quantité et le type d'énergie disponible.
- ✓ Puissances disponibles.
- ✓ Densité d'énergie et de stockage de puissance, qui détermine le volume et le poids du système
- ✓ Le coût et la maintenance liés à la maturité de la technologie.
- ✓ Nombre de cycles et profondeur de décharge.
- ✓ La sécurité.

I. 8 Comparaison des différentes technologies de stockage de l'électricité :

Le graphique présenté ci-dessous compare les capacités de stockage en fonction de la durée de décharge.

Les différentes technologies de stockage en fonction de leur puissance et du temps de décharge (autonomie)

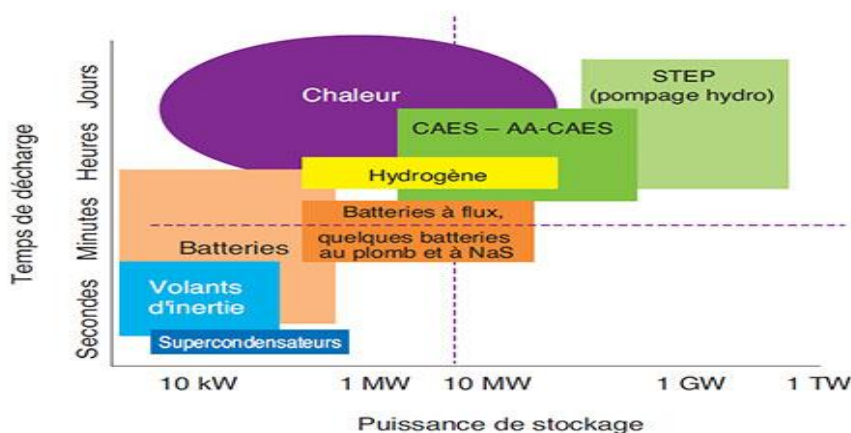


Figure I.15: Les Capacités des différents moyens de stockage d'énergie. [8]

I. 9 Energie solaire (photovoltaïque) :

Le Soleil est une gigantesque sphère de gaz chaud principalement composée d'hydrogène et d'hélium, avec des traces d'autres éléments. À l'intérieur de son noyau, des réactions de fusion nucléaire se produisent continuellement, transformant l'hydrogène en hélium et libérant une énorme quantité d'énergie, conformément à la célèbre formule d'Einstein, $E=mc^2$. Cette énergie est émise sous forme de rayonnement électromagnétique, dont une partie atteint la Terre sous forme d'irradiance solaire moyenne. La technologie photovoltaïque exploite cette énergie solaire en convertissant directement une partie du rayonnement en électricité à l'aide de cellules photovoltaïques. Ces cellules utilisent l'effet photovoltaïque pour générer une force électromotrice lorsque la lumière du soleil les frappe. [11]

I.9.1 La cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque élémentaire est un générateur de faible puissance qui produit seulement quelques watts sous une tension inférieure à un volt, sur une surface de quelques dizaines de centimètres carrés. Afin d'augmenter la puissance de sortie, plusieurs cellules photovoltaïques sont assemblées pour former un module ou un champ photovoltaïque. Cela permet de combiner les courants et les tensions des cellules individuelles pour obtenir une puissance totale plus élevée. [12]

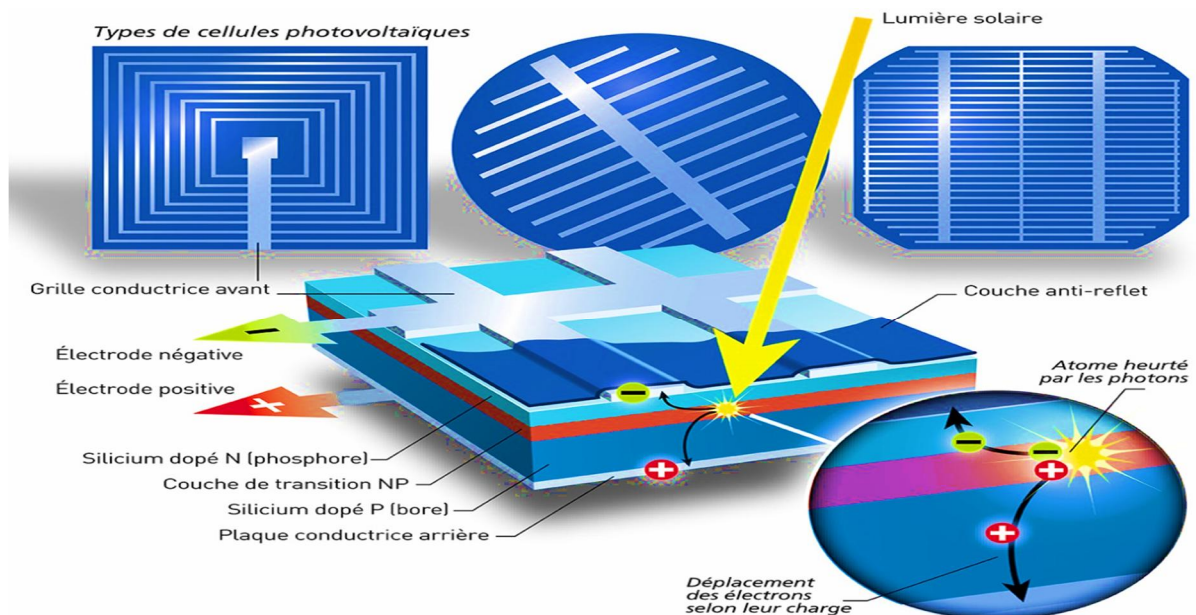
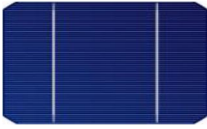

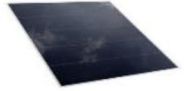

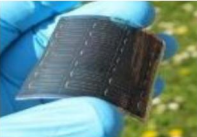
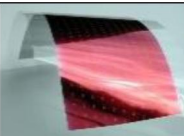


Figure I.16: cellule photovoltaïque (PV) et principe de fonctionnement.[12]

I.9.2. Technologie d'une cellule photovoltaïque :

Pendant de nombreuses années, les technologies cristallines à base de silicium, telles que le silicium multi cristallin et monocristallin, ont été les leaders sur le marché de l'énergie photovoltaïque en raison de leur efficacité et de leur fiabilité. Cependant, ces dernières années, les technologies de couches minces, telles que le sulfure de cuivre indium (CIS) et le tellure de cadmium (CdTe), ont gagné en popularité et connaissent une croissance significative sur le marché. Elles offrent un avenir prometteur pour l'énergie photovoltaïque. [13]

Tableau I.2: Performances des différentes technologies des cellules photovoltaïques [14]

Type de cellule	Rendement	Avantage	Inconvénient	Image
Silicium Mono-cristalline	13-17%	Bonne performance pour une cellule	Coût de fabrication élevé, perte de matière lors de la fabrication	
Silicium Poly-cristallin	11-15%	Bonne performance pour une cellule	Coût de fabrication élevé, perte de matière lors de la fabrication	
Silicium amorphe	5-9%	Facile à fabriquer	Mauvais rendement	
CdTe	7-11%	Absorbe 90% des photons incidents	Cadmium très polluant	
CIGS	20%	Énergie d'entrefer réglable, 99 % des photons absorbés	Manque de matière première	
Cellules organiques	≤ 5%	Énergie d'entrefer réglable, 99 % des photons absorbés	Rendement encore trop bas	

I.9.3. Les types de Système photovoltaïque :

Les systèmes photovoltaïques sont généralement divisés en deux catégories : autonomes et raccordés au réseau électrique.

I.9.3.1 Système photovoltaïque autonome :

Un système photovoltaïque autonome, également appelé système solaire autonome ou système hors réseau, utilise des panneaux solaires pour convertir l'énergie solaire en électricité, qui est ensuite stockée dans des batteries. Ce type de système est conçu pour fonctionner indépendamment du réseau électrique principal. Il comprend des modules photovoltaïques, un régulateur de charge, des batteries et éventuellement un onduleur. [15].

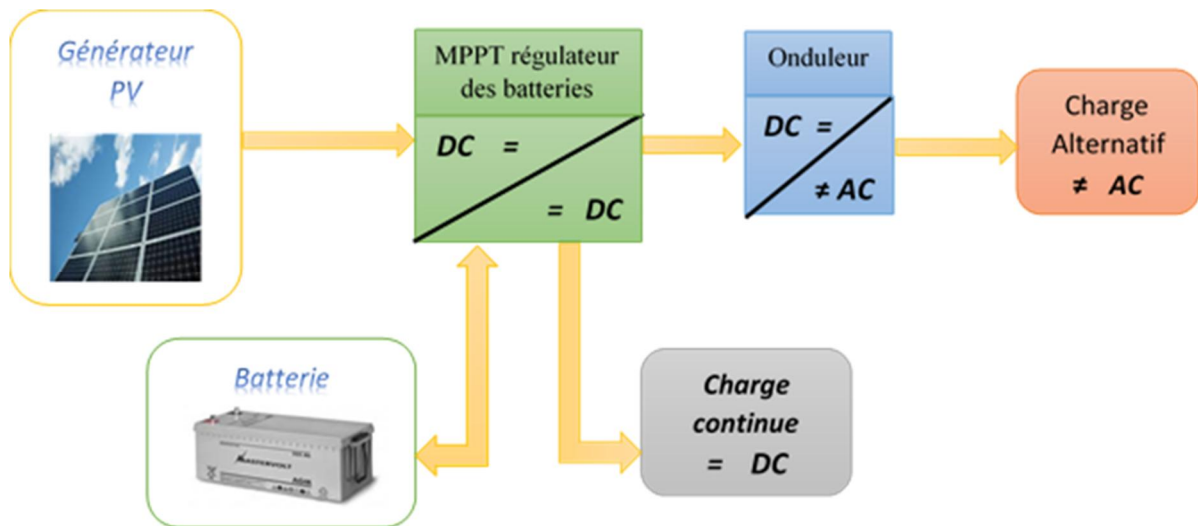


Figure I.17: Système photovoltaïque autonome

I. 9.3.2 Système photovoltaïque raccordé au réseau :

Un système photovoltaïque raccordé au réseau, également appelé système solaire domestique, utilise l'énergie solaire pour produire de l'électricité qui est ensuite injectée directement dans le réseau électrique public. L'onduleur est responsable de la conversion du courant continu produit par les modules photovoltaïques en courant alternatif conforme au réseau électrique. La figure I.18 présente le fonctionnement d'un système photovoltaïque connecté au réseau. [16,17].

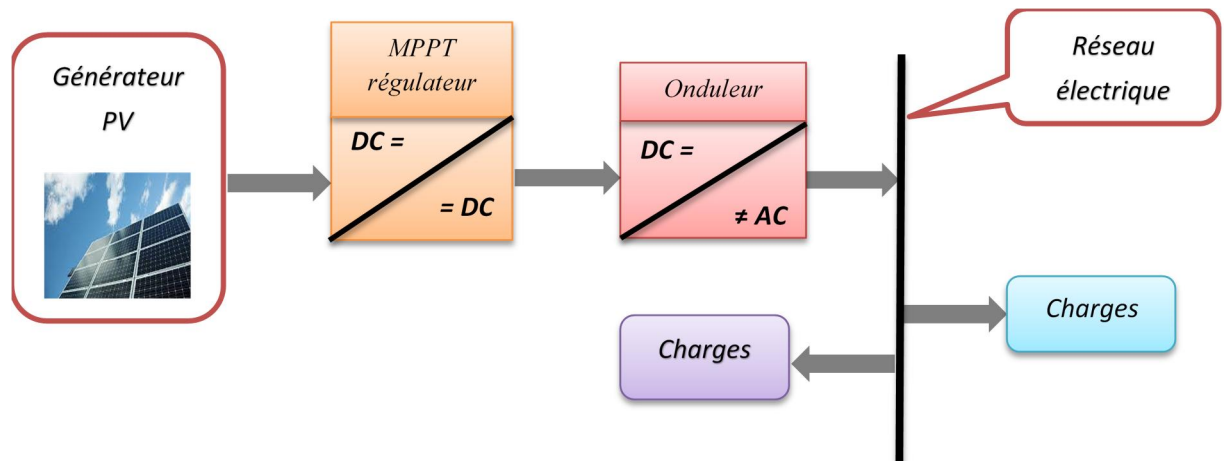


Figure I.18: Système photovoltaïque (PV) raccordé au réseau électrique

I. 9.4. Avantages et inconvénients d'énergie photovoltaïque :

Les systèmes photovoltaïques présentent de nombreux avantages, mais ils comportent également quelques inconvénients [18]

I. 9.4.1 Les avantages :

- ✓ La gratuité de l'énergie solaire et l'absence de pollution lors de la production d'électricité.
- ✓ La fiabilité et la longue durée de vie de l'installation.
- ✓ La structure fixe des panneaux solaires qui ne nécessite pas de mouvements mécaniques.
- ✓ Les coûts de maintenance relativement bas.
- ✓ La flexibilité des systèmes photovoltaïques, permettant un dimensionnement adapté aux besoins et une modularité.
- ✓ L'absence de bruit généré par l'installation solaire.
- ✓ Le potentiel illimité de l'énergie solaire, où seulement 5% de la surface des déserts pourrait suffire à alimenter l'ensemble de la planète.

I. 9.4.2. Les inconvénients : [19]

- Le coût élevé de l'installation initiale, bien que les prix aient considérablement diminué ces dernières années.
- Le rendement relativement bas de l'effet photovoltaïque, ce qui signifie que seule une partie de l'énergie solaire incidente est convertie en électricité.

- La réduction de la puissance produite en cas de conditions climatiques défavorables, comme la présence de nuages, qui réduit l'intensité du rayonnement solaire atteignant les panneaux photovoltaïques.

I.10. Conclusion :

Nous avons discuté de différents types d'énergie électrique, de leurs sources et des solutions envisageables dans le domaine des énergies renouvelables, en tenant compte des avancées de la recherche. Nous avons également présenté les méthodes de stockage d'énergie électrique actuellement étudiées, soit à court terme, soit à long terme, en mettant en évidence leurs caractéristiques, leurs avantages et leurs inconvénients. Enfin, nous avons expliqué le fonctionnement des systèmes utilisant l'énergie photovoltaïque, en détaillant ses différents types et composants, afin de garantir une production électrique optimale.

Chapitre II: Modélisation de la chaîne de production Photovoltaïque

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous examinerons le système de conversion photovoltaïque, en abordant l'effet photoélectrique, la modélisation du convertisseur DC-DC Boost, ainsi que l'algorithme de suivi du point de puissance maximale (MPPT - Maximum Power Point Tracking). L'objectif principal est de permettre au convertisseur de fournir une alimentation continue à une charge en utilisant efficacement le générateur photovoltaïque, en maximisant sa puissance, indépendamment des conditions météorologiques telles que la température et le rayonnement solaire.

II.2. La Chaînes de conversion du système photovoltaïque

L'ajout d'un système photovoltaïque supplémentaire en complément du générateur principal permet de fournir de l'énergie à plus de 20 % des éléments secondaires à proximité, tels que les dispositifs d'agencement alimentés. Habituellement, un système de stockage est composé de batteries rechargeables, qui nécessitent une sélection minutieuse en raison de leur coût élevé. Pour une adaptation optimale, un convertisseur DC/DC ou DC/AC est utilisé pour réguler la charge de la batterie et/ou suivre le point de puissance maximale (MPPT) du générateur photovoltaïque. La durée de vie des panneaux photovoltaïques est d'environ 20 à 30 ans, tandis que celle des batteries est généralement de 8 à 10 ans.

Le système photovoltaïque est contrôlé par le MPPT et se compose de quatre éléments principaux. Le premier élément est la source d'alimentation, qui est le panneau photovoltaïque convertissant la lumière en courant continu. Le deuxième élément est un convertisseur DC/DC qui optimise l'impédance afin de fournir la puissance maximale du panneau. Le troisième élément est le système de contrôle MPPT, basé sur un algorithme qui ajuste en permanence le rapport cyclique pour extraire la puissance maximale. Enfin, le quatrième élément représente le système d'agencement. [20].

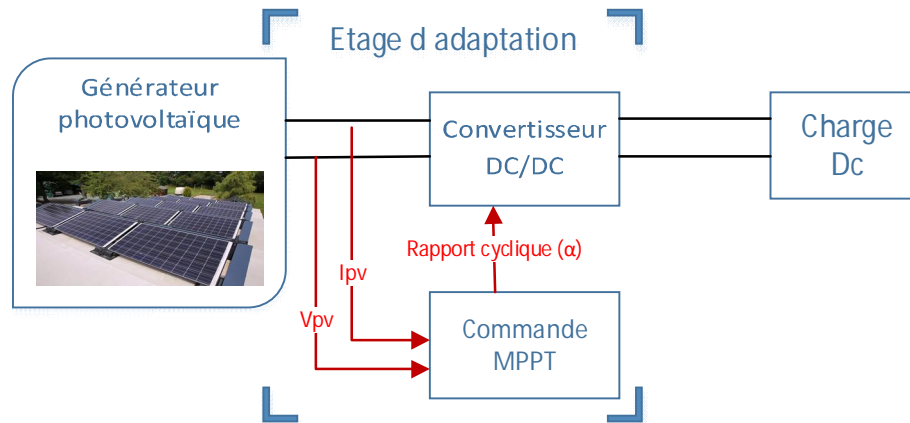


Figure II.1: la Chaîne élémentaire de conversion PV avec à une commande MPPT

II.3. Différents modèles mathématiques du générateur photovoltaïque

Les modèles à une diode et à deux diodes sont des représentations équivalentes utilisées pour simuler le comportement électrique des modules photovoltaïques (PV). Le modèle à une diode est une approximation simplifiée du module PV, tandis que le modèle à deux diodes est plus précis car il prend en compte certains phénomènes physiques non pris en compte dans le modèle à une diode. [21].

II.3.1. Avantages et inconvénients de chaque modèle

Le modèle à une diode et le modèle à deux diodes ont leurs avantages et leurs inconvénients pour la modélisation des modules photovoltaïques.

a) Avantages du modèle à une diode :

- Simplicité d'utilisation avec peu de paramètres requis.
- Convient aux simulations de systèmes photovoltaïques à grande échelle.
- Simulation plus rapide que le modèle à deux diodes.

b) Inconvénients du modèle à une diode :

- Ne prend pas en compte certains phénomènes physiques comme la recombinaison des porteurs de charge.
- Moins précis pour les modules PV de haute qualité.

c) Avantages du modèle à deux diodes :

- Plus de précision en prenant en compte la recombinaison des porteurs de charge.
- Convient aux simulations de modules PV de haute qualité.

d) Inconvénients du modèle à deux diodes :

- Complexité d'utilisation avec plus de paramètres requis.
- Simulation plus lente que le modèle à une diode.

Le choix entre les deux modèles dépend des besoins de simulation et de la précision requise. Le modèle à une diode convient lorsque la précision n'est pas essentielle et que la simulation doit être rapide. Le modèle à deux diodes est préférable lorsque la précision est importante et que la recombinaison des porteurs de charge doit être prise en compte. [22].

II.3.2. Modélisation de la cellule photovoltaïque

Le domaine photovoltaïque comprend différentes unités qui sont composées de cellules, constituant ainsi l'élément fondamental pour la modélisation. Parmi les modèles électriques de cellules disponibles, il existe le modèle à une diode, à deux diodes et à trois diodes. [23]

Le modèle à une diode présente un bon compromis entre simplicité et précision, ce qui le rend particulièrement approprié pour notre étude. Ce modèle est constitué d'un photo-courant, d'une diode, d'une résistance en parallèle et d'une résistance en série, comme le montre la Figure II.2.

L'équation qui décrit la caractéristique tension-courant de la cellule solaire est exprimée par l'équation suivante: [24].

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{v + R_s I}{V_t \alpha}\right) - 1 \right] - \frac{v + R_s I}{R_p} \quad (II.1)$$

Dans ce modèle, I_{ph} représente le photo-courant, I_0 correspond au courant de saturation, R_s est la résistance série de la cellule, R_p représente la résistance parallèle de la cellule, α est le facteur d'idéalité de la diode et V_t désigne la tension thermique.

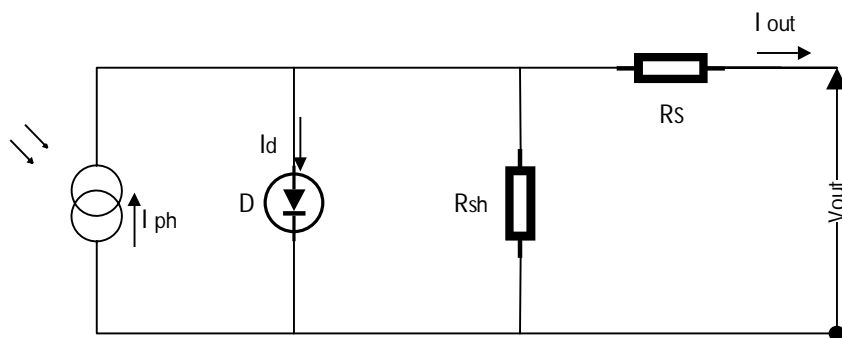


Figure II.2: le Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

Les équations qui décrivent les expressions du photo-courant et du courant de saturation sont les suivantes : (II.2) et (II.3) :

$$I_{ph} = (I_{sc} + K_i dT) \frac{G}{G_n} \quad (II.2)$$

$$I_0 = \frac{I_{sc} + K_i dT}{\exp \left[\frac{V_{oc} + K_i dT}{V_t \alpha} \right] - 1} \quad (II.3)$$

Dans cette expression, le courant de court-circuit (I_{sc}) représente le courant lorsque la cellule solaire est court-circuitée. Le coefficient de température de court-circuit (K_i) et le coefficient de température en circuit ouvert (K_v) décrivent la variation du courant et de la tension de la cellule solaire en fonction de la température (T). La tension en circuit ouvert (V_{oc}) est la tension aux bornes de la cellule solaire lorsque celle-ci n'est pas connectée à un circuit. L'irradiance solaire (G) correspond à la quantité de rayonnement solaire incident sur la cellule solaire, tandis que (G_n) représente l'irradiance solaire nominale. [25]

L'équation (II 4) représente la relation mathématique qui décrit la caractéristique tension-courant du champ photovoltaïque.

$$I = N_{pp} I_{ph} - N_{pp} I_0 \left[\exp \left(\frac{V + \left(\frac{R_s N_{ss}}{N_{pp}} \right) I}{V_t \alpha} \right) - 1 \right] - \frac{V + \left(\frac{R_s N_{ss}}{N_{pp}} \right) I}{\frac{R_p N_{ss}}{N_{pp}}} \quad (II.4)$$

où N_{pp} et N_{ss} sont respectivement le nombre de module en parallèle et en série.

Les résistances, à savoir la résistance série (R_s) et la résistance shunt (R_{sh}), ont une influence significative sur la caractéristique $I=f(V)$ de la cellule solaire. La résistance série (R_s) correspond à la résistance interne de la cellule et est principalement déterminée par la résistance du semi-conducteur utilisé, la résistance de contact des grilles collectrices et la résistivité de ces grilles. Quant à la résistance shunt (R_{sh}), elle est causée par un courant de fuite au niveau de la jonction et dépend de la manière dont cette jonction a été construite.

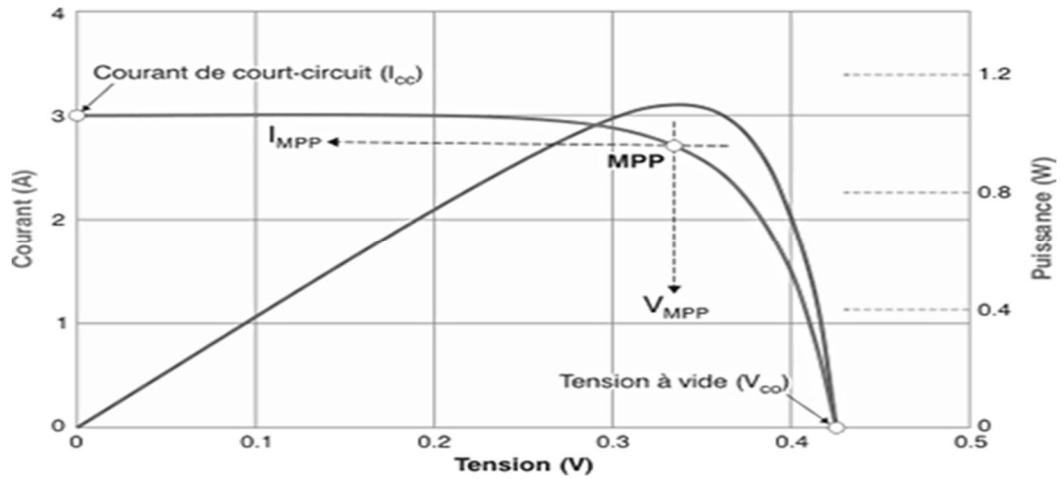


Figure II.3: Influence des résistances série et shunt d'une cellule photovoltaïque

Sous un éclairage spécifique, chaque cellule photovoltaïque est associée à une courbe courant-tension (I-V) qui représente les différentes configurations électriques possibles de la cellule. Trois grandeurs physiques sont utilisées pour définir cette courbe : [26]

- Sa tension à vide : (V_{co}). Cette valeur représenterait la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.
- Son courant court-circuit: (I_{cc}). Cette valeur représenterait le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.
- Son point de puissance maximal: MPP (en anglais : maximal power point) obtenu pour une tension et un courant optimaux : (V_{opt}), (I_{opt}). (Parfois appelés aussi V_{mpp} , I_{mpp})

II.3.3. La caractéristique courant-tension (I_{pv} , V_{pv}) d'une cellule photovoltaïque

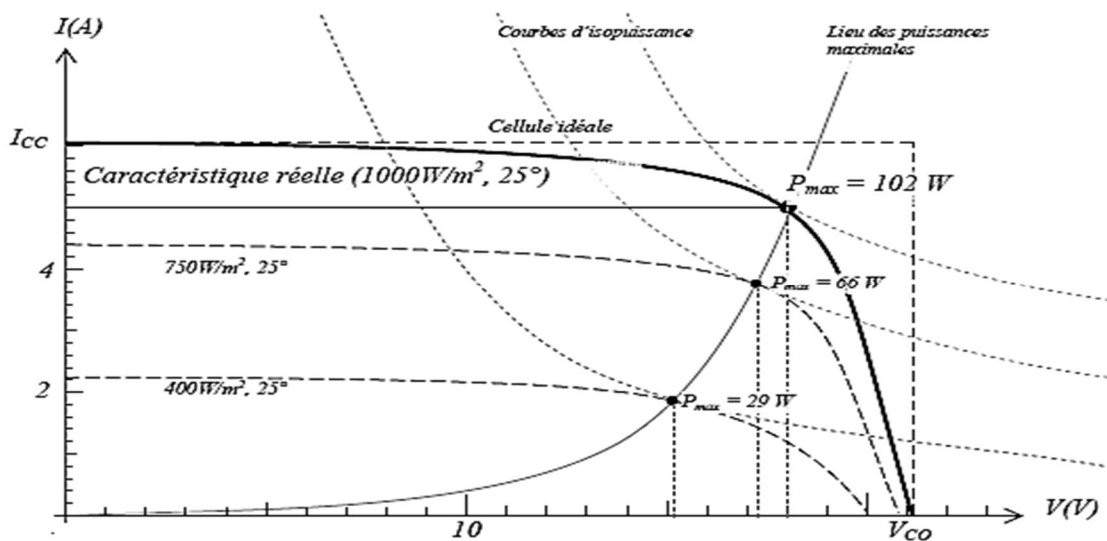


Figure II.4: Caractéristique courant-tension (I_{pv} , V_{pv}) d'une cellule photovoltaïque

La courbe caractéristique d'une cellule photovoltaïque représente la relation entre le courant généré par la cellule et la tension appliquée à ses bornes. Cette courbe est établie en prenant en compte les conditions ambiantes spécifiques dans lesquelles la cellule fonctionne. Les performances des cellules photovoltaïques sont influencées par des facteurs tels que l'ensoleillement et la température de la surface de la cellule. Par conséquent, chaque courbe courant-tension correspond à des conditions de fonctionnement spécifiques. En cas de variation des conditions ambiantes, comme la température de la surface de la cellule, la courbe caractéristique sera modifiée. [27]

II.3.4. Grandeurs caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

a. Tension de circuit ouvert VCO (pour $I_{CO} = 0$) : La courbe caractéristique d'une cellule photovoltaïque est obtenue en connectant directement un voltmètre aux bornes de la cellule.

b. Courant de court-circuit ICC (pour $V_{CC} = 0$) : La tension nulle correspond au courant maximum de la cellule photovoltaïque. Sa valeur est obtenue en connectant un ampèremètre aux bornes de la cellule.

c. La puissance maximale d'une cellule : Une cellule PV possède un point pour lequel sa puissance débitée est maximum. Ce point est tangent à une courbe d'iso puissance. On la nomme (P_{max})

d. Facteur de forme : Le facteur de forme, noté f , est défini comme le rapport entre la puissance maximale fournie par une cellule photovoltaïque (P_{max}) dans des conditions spécifiques d'éclairement, de température et de vitesse de circulation de l'air ambiant, et le produit du courant de court-circuit (ICC) par la tension de circuit ouvert (VCO). En d'autres termes, il représente la proportion de la puissance maximale d'une cellule idéale qui est effectivement produite par la cellule réelle.

$$f = \frac{P_{max}}{V_{CO} \times I_{CC}} \quad (II.5)$$

e. La puissance crête d'une cellule PV : Lorsque des cellules solaires sont utilisées en présence de rayonnement solaire, la puissance maximale de la cellule solaire, notée W_c (Watt crête) ou W_p (Watt peak), correspond à la puissance électrique maximale délivrée dans des conditions spécifiques appelées "conditions standard". [28]

- Éclairement solaire de 1 kW / m²

- Température de la cellule PV égale à + 25 °C.
- Répartition spectrale du rayonnement dit AM.1,5

f. Influence de la température : L'influence de la température sur une cellule photovoltaïque est significative. Pour le silicium, on observe que lorsque la température augmente, le courant augmente d'environ 0,025 mA/cm²/°C, tandis que la tension diminue de 2,2 mV/°C par cellule. Cette variation entraîne une diminution de la puissance d'environ 0,4% par degré Celsius. Il est important de prendre en compte cette influence lors du dimensionnement du générateur photovoltaïque.

II.4. Simulation du générateur photovoltaïque

La simulation d'un générateur photovoltaïque consiste à utiliser des modèles mathématiques et informatiques pour prédire le fonctionnement et la production d'électricité d'un système solaire photovoltaïque. Ce processus implique la prise en compte de différents paramètres tels que la puissance des panneaux solaires, les conditions météorologiques, l'orientation et l'inclinaison des panneaux, afin d'estimer la quantité d'énergie solaire convertie en électricité. [29].

II.4.1 Choix et caractérisation du module photovoltaïque

En prend par exemple une cellule de module IS-150 C/12.

Ce module possède les caractéristiques suivantes à 1000 (w/m²) et 25°C.

Tableau II.1: Caractéristiques du module IS-150 C/12.

Puissance optimale	Courant de court-circuit	Tension a circuit ouvert	Courant optimale	Tension optimale
150 W	9.3A	21.6V	8.7A	17.3V

II.4.2. Influence du l'éclairement sur les module PV

La Figure (II.5) présente les caractéristiques (I_{pv} , V_{pv}) pour fixe la températures (25°C) de fonctionnement du module photovoltaïque, permettant d'analyser l'effet de l'éclairement sur le module photovoltaïque.

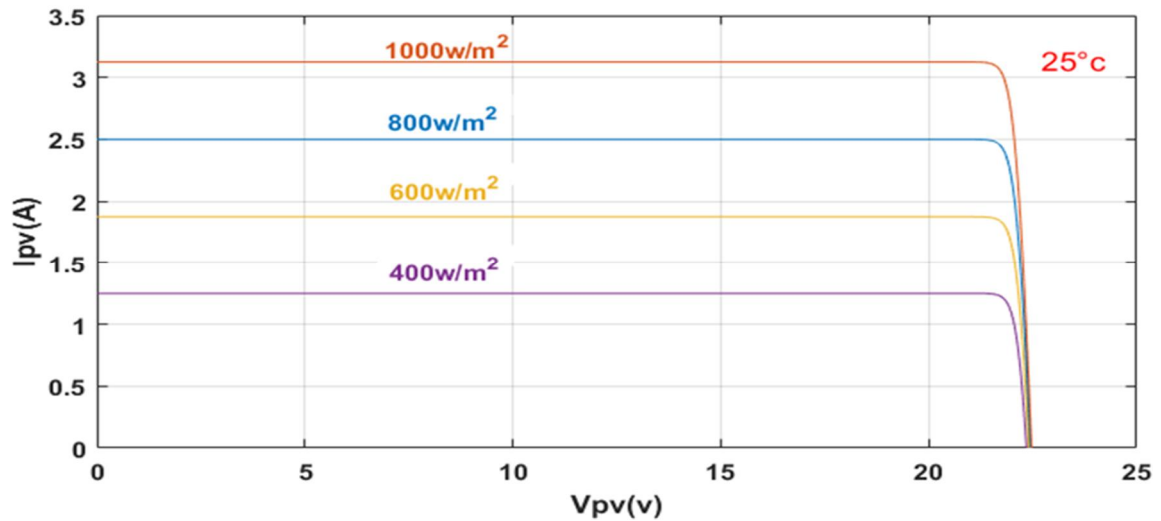


Figure II.5: Effet de l'éclairement sur la caractéristique, (I_{pv} , V_{pv} ,)

l'éclairement a un effet sur la caractéristique I_{pv} , qui correspond au courant électrique généré par le panneau photovoltaïque. Une augmentation de l'éclairement entraîne généralement une augmentation du courant photovoltaïque. Cela signifie que plus la lumière solaire est intense, plus le courant électrique produit par le panneau est important.

II.4.3. Influence de la température sur les module PV

La Figure (II.6) présente les caractéristiques (I_{pv} , V_{pv}) pour différentes températures de fonctionnement du module photovoltaïque, permettant d'analyser l'effet de la température sur le module photovoltaïque.

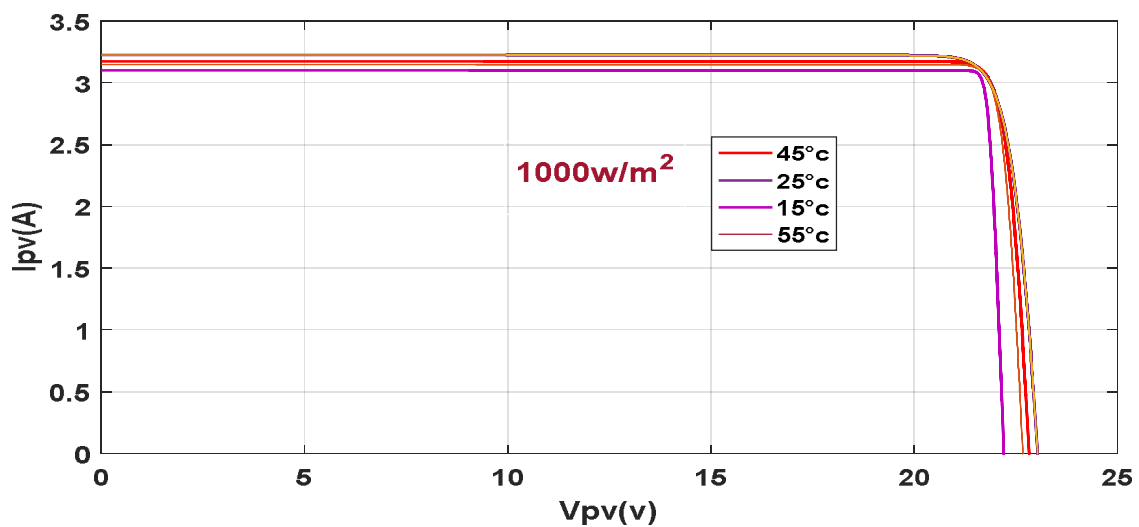


Figure II.6: Effet de la température sur la caractéristique, (I_{pv} , V_{pv})

Nous observons l'effet de l'augmentation de la température sur la chute de tension du panneau PV, ce qui révèle une chute de tension relativement insignifiante.

II.4.4. Influence du rayonnement sur les modules Photovoltaïques

La Figure II.7 expose l'effet du rayonnement sur la puissance, le courant et la tension du module photovoltaïque, dans le but d'analyser son influence sur le système photovoltaïque. On remarque une relation directement proportionnelle entre l'intensité du rayonnement et les valeurs du courant de court-circuit ainsi que de la puissance. Cela indique que plus le rayonnement solaire est intense, plus le courant de court-circuit et la puissance générée par le module photovoltaïque seront élevés.

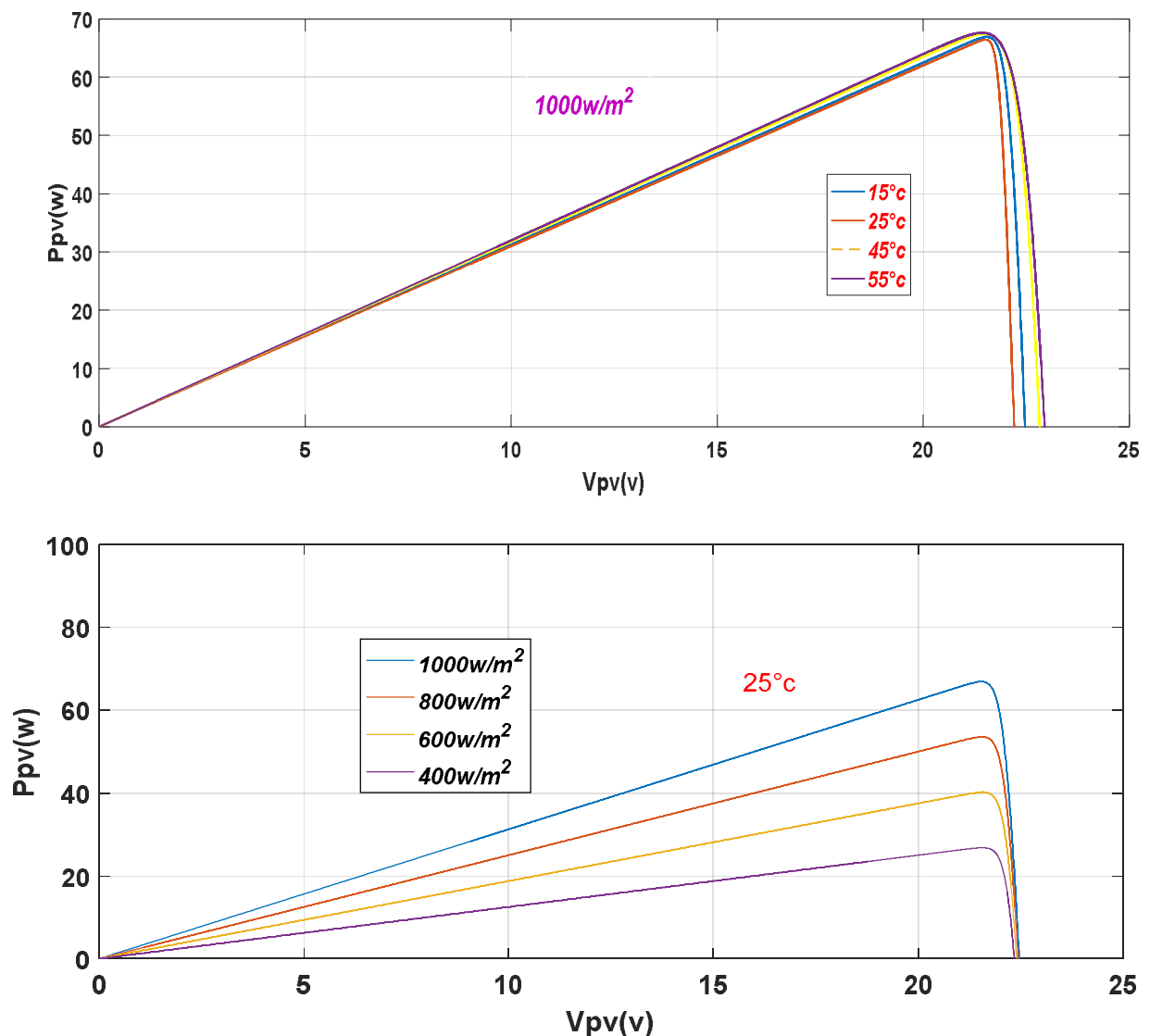


Figure II.7: Effet de l'éclairement sur la caractéristique (P_{pv} , V_{pv})

En résumé, l'impact de l'intensité du rayonnement sur un module photovoltaïque se manifeste principalement par des variations significatives du courant de court-circuit et de la puissance, tandis que la tension en circuit ouvert ne varie pas de la même manière. Bien que l'augmentation de l'intensité du rayonnement puisse entraîner une légère augmentation de la tension en circuit ouvert, cette variation n'est pas aussi prononcée. La tension en circuit ouvert dépend des caractéristiques intrinsèques du module et de ses conditions de fonctionnement, et n'est pas directement liée à l'intensité du rayonnement. Ces observations sont cruciales pour la conception et l'optimisation des systèmes photovoltaïques, permettant de comprendre comment les variations de l'intensité du rayonnement solaire influent sur les performances du module. En tenant compte de ces relations, il est possible de dimensionner correctement les systèmes et de maximiser leur rendement en fonction des conditions d'éclairement

II.5. Générateur Photovoltaïque GPV

Les cellules solaires sont regroupées en série et en parallèle pour former des modules photovoltaïques, qui sont ensuite encapsulés dans un boîtier en verre. Ces modules sont ensuite connectés les uns aux autres pour former un générateur photovoltaïque capable de produire une puissance continue élevée, compatible avec les appareils électriques conventionnels. La connexion en série et en parallèle des modules permet d'augmenter la tension et l'intensité à la sortie du générateur. Les modules photovoltaïques sont fixés sur des supports métalliques et inclinés selon l'angle souhaité en fonction de leur emplacement. L'ensemble de ces modules interconnectés est communément appelé un champ de modules. [30]

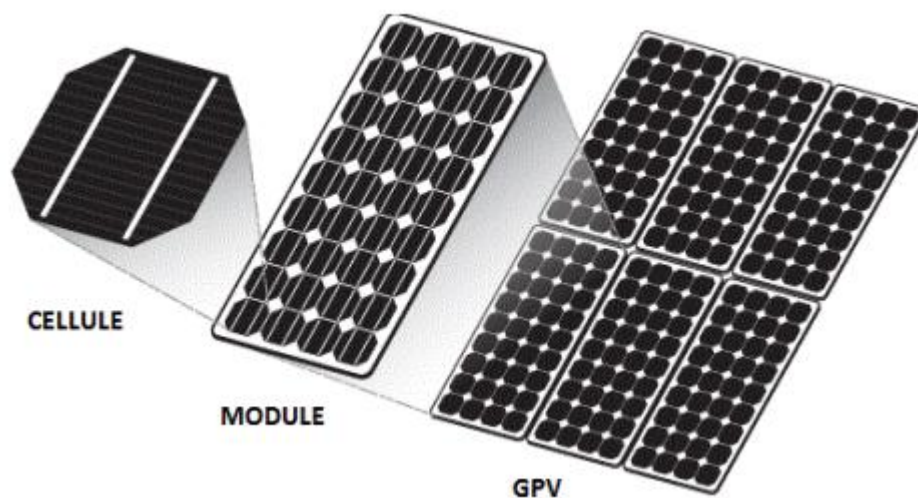


Figure II.8: Les composants d'un générateur photovoltaïque (GPV)

Les paramètres de sortie d'un générateur solaire dans une rangée photovoltaïque sont le courant et la tension. Ils sont déterminés par les caractéristiques électriques des modules solaires qui composent la rangée et par les conditions de fonctionnement, notamment l'ensoleillement et la température ambiante. [31]

$$\begin{cases} V_{\text{out}} = \sum_n V_n = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + \dots + V_n \\ I_{\text{out}} = \sum_m I_m = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + \dots + I_m \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

La puissance de sortie du générateur solaire, notée P_{out} , peut être calculée en utilisant la formule suivante :

$$P_{\text{out}} = \sum_n V_n \sum_m I_m = (V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + \dots + V_n)(I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + \dots + I_m) \quad (\text{II.7})$$

II.5.1 Rendement d'un générateur photovoltaïque

L'efficacité énergétique d'un générateur photovoltaïque est définie comme le rapport entre la puissance maximale produite par le générateur (P_m) et la puissance du rayonnement solaire incident. Ce ratio permet d'évaluer l'efficacité avec laquelle le générateur convertit l'énergie solaire en électricité utilisable.

Soit E l'éclairement incident en W/m^2 et S la surface du générateur, le rendement est donné par la formule suivante :

$$\eta = \frac{P_m}{E * S} \quad (\text{II.8})$$

Le rendement d'un générateur photovoltaïque est influencé par le matériau et la technique utilisés pour fabriquer les cellules solaires. Les fabricants fournissent souvent cette information dans les fiches techniques des panneaux photovoltaïques, et le rendement est généralement mesuré dans des conditions standardisées. Ces conditions standardisées comprennent une température de 25°C , un ensoleillement de 1 kW/m^2 et une masse d'air de 1,5 (AM : Air Mass). Ces conditions permettent de comparer les performances des différents modules solaires sur une base commune et de déterminer leur efficacité respective.

II.6. Modélisation du convertisseur DC-DC

Lorsqu'on souhaite connecter directement un générateur photovoltaïque (GPV) à une charge continue, il est important de trouver un point de fonctionnement où les caractéristiques courant-tension (I - V) du GPV et de la charge se croisent, indépendamment de la nature de cette dernière.

Cependant, ce point de croisement peut être éloigné du point de puissance maximale (PPM) du GPV.

Pour optimiser la puissance de sortie P-V et atteindre son maximum, il est possible d'ajouter un convertisseur DC/DC entre le générateur PV et la charge, équipé d'un dispositif de suivi du point de puissance maximale (PPM) appelé Maximum Power Point Tracker (MPPT). Le MPPT utilise un algorithme de contrôle pour maintenir le GPV au PPM, ce qui permet d'exploiter au maximum la puissance disponible. [32]

Dans la configuration illustrée dans la Figure II.9, l'entrée du convertisseur DC/DC est associée à la courbe P-V du générateur, tandis que la sortie est connectée à la charge. Le rôle du MPPT est d'assurer le bon fonctionnement du GPV au PPM, ce qui permet d'exploiter au maximum la puissance disponible. Cette approche permet d'optimiser l'efficacité du système de conversion photovoltaïque en maximisant la puissance de sortie. [33]

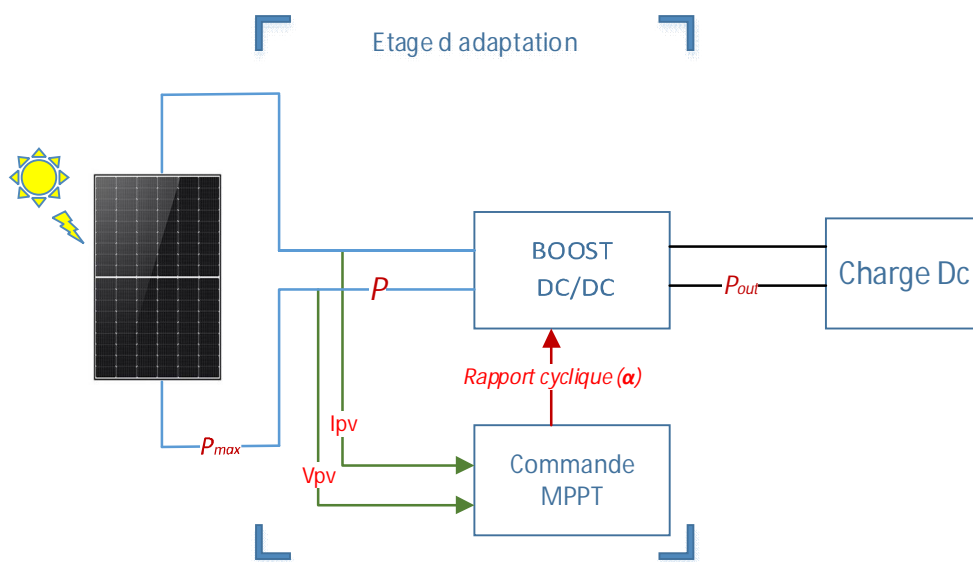


Figure II.9: Schéma fonctionnel général du système PV avec MPPT

II.6.1. Modélisation du Convertisseur DC/DC (Boost)

Le convertisseur Boost, également connu sous le nom d'élévateur de tension, est un type de convertisseur DC-DC utilisé pour augmenter la tension d'entrée à une valeur de sortie supérieure. La configuration électrique du Boost est présentée dans la Figure (II.10).

Au début de la première période, le transistor S est activé, ce qui signifie qu'il est en mode de conduction. Pendant cette période, le courant circule à travers l'inductance L et augmente progressivement, stockant de l'énergie dans l'inductance. [34]

Ensuite, à la fin de la première période, le transistor S est désactivé. Lorsque cela se produit, l'inductance (L) s'oppose à la diminution du courant (IL), créant une tension inverse aux bornes de l'inductance. Cette tension inverse s'ajoute à la tension de la source, formant une tension combinée appelée tension de Boost.

Cette tension de Boost est ensuite appliquée à la charge (Z) à travers la diode (D1), permettant au courant de circuler dans la charge. [35]

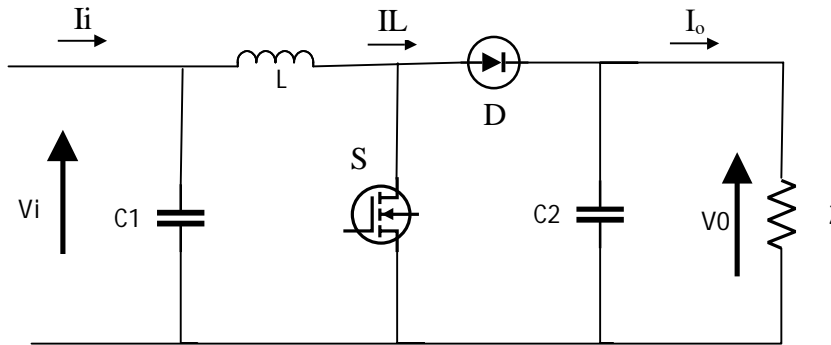


Figure II.10: Circuit électrique du convertisseur Boost.

II.6.2. Modèle mathématique équivalent

En appliquant les lois de Kirchhoff aux deux circuits équivalents des deux phases de fonctionnement, nous obtenons les résultats suivants pour la première période DTs

$$\begin{cases} i_{c1} = C_1 \frac{dvi}{dt} = i_i - i_l \\ i_{c2} = C_2 \frac{dv_0}{dt} = -i_0 \\ v_L = L \frac{di_l}{dt} = v_i - R_l i_l \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

Ces résultats permettent de déterminer les équations de tension et de courant dans le circuit Boost lors de la première période DTs.

Pour la deuxième période (1-D) Ts :

$$\begin{cases} i_{c1} = C_1 \frac{dvi}{dt} = i_i - i_l \\ i_{c2} = C_2 \frac{dv_0}{dt} = i_l - i_0 \\ v_L = L \frac{di_l}{dt} = v_i - v_0 - R_l i_l \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

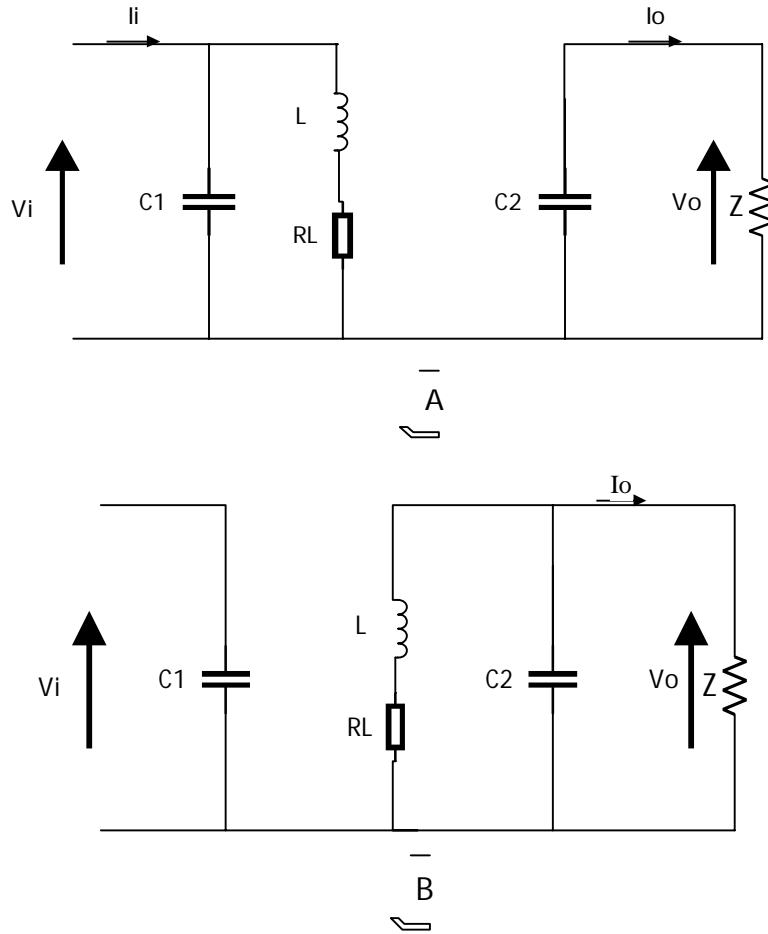


Figure II.11: Circuits équivalents du convertisseur Boost, (A) : (S) fermé, (B) : (S) ouvert.

II.6.3. Modèle approximé du convertisseur Boost

En utilisant les relations présentées dans les équations (II.9) et (II.10), nous pouvons dériver le modèle approximatif du convertisseur Boost : [36]

$$\begin{cases} C_1 \frac{dv_i}{dt} Ts = DTs(i_i - i_L) + (1 - D)Ts(i_i - i_L) \\ C_2 \frac{dv_o}{dt} Ts = -DTs(i_o) + (1 - D)Ts(i_L - i_o) \\ L \frac{di_L}{dt} Ts = DTs(v_i - R_L i_L) + (1 - D)Ts(v_i - v_o - R_L i_L) \end{cases} \quad (II.11)$$

La modélisation dynamique du convertisseur Boost peut être obtenue en utilisant les équations qui décrivent son fonctionnement. Voici les équations principales :

$$\begin{cases} i_L = i_i - C_1 \frac{dv_i}{dt} \\ i_o = (1 - D)i_L - C_2 \frac{dv_o}{dt} \\ v_i = (1 - D)v_o + R_L i_L + L \frac{di_L}{dt} \end{cases} \quad (II.12)$$

II.7. Définition de la commande suivie du point de puissance maximale (PPM)

La commande du point de puissance maximale (PPM) est une technique de régulation en temps réel largement utilisée dans les systèmes solaires et éoliens afin d'optimiser la production d'énergie. Son principe consiste à ajuster les paramètres de fonctionnement, tels que la tension ou le courant, de manière à maintenir le système au point de puissance maximale. Cette approche permet d'atteindre une production d'énergie optimale, de minimiser les pertes d'énergie et d'améliorer les performances globales du système. Le PPM correspond au point de fonctionnement qui permet de générer le plus grand rendement énergétique compte tenu des conditions spécifiques, comme l'intensité lumineuse ou la vitesse du vent. Ces conditions peuvent varier en fonction de différents facteurs, tels que les conditions météorologiques, l'heure de la journée, l'orientation du système, et bien d'autres encore [37].

II.7.1. Différentes techniques de suivi du point de puissance maximale (PPM)

L'optimisation de la production d'énergie solaire en suivant le point de puissance maximale (MPPT) est une stratégie fondamentale. Les méthodes MPPT sont généralement classées en deux grandes catégories : les techniques MPPT classiques et les techniques MPPT intelligentes

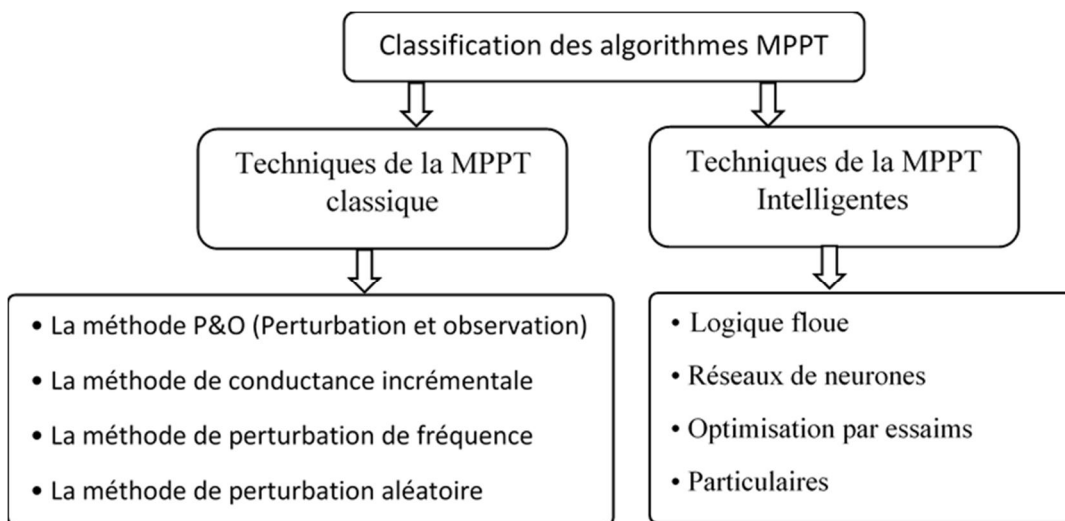


Figure II.12: classification des algorithmes de suivi du PPM

II.7.1.1. Techniques de la PPM classique :

Les techniques de la PPM classique utilisent des algorithmes basés sur des règles pour réguler le point de fonctionnement optimal du système. Ces techniques incluent :

- La méthode P&O (Perturbation et observation)

- La méthode de conductance incrémentale
- La méthode de perturbation de fréquence
- La méthode de perturbation aléatoire

Ces techniques sont relativement simples et ont été utilisées pendant de nombreuses années pour réguler la production d'énergie. Elles peuvent être moins coûteuses et plus faciles à mettre en œuvre que les techniques intelligentes, mais elles peuvent être moins précises et avoir des temps de réponse plus lents. [38]

II.7.1.2 Techniques Intelligentes du PPM :

Les technologies intelligentes au MPPT (Maximum Power Point Tracking) sont des techniques de régulation avancées qui utilisent des algorithmes d'intelligence artificielle, tels que les réseaux de neurones, les logiques floues et les algorithmes génétiques, pour optimiser la production d'énergie des systèmes solaires et éoliens.

- Logique floue
- Réseaux de neurones
- Optimisation par essais
- Particulaires

Les technologies intelligentes au MPPT sont plus coûteuses et plus complexes à mettre en œuvre que les techniques classiques, mais peuvent être nécessaires dans les systèmes à grande échelle ou dans des conditions de fonctionnement difficiles.

En général, les méthodes à base de modèle sont considérées comme les plus précises, mais aussi les plus complexes, tandis que les méthodes P&O et perturbation aléatoire sont plus simples à simuler et implémenter en temps réel. [39]

II.7.2. La méthode de perturbée et observe (P&O)

La commande MPPT de type Perturbation et Observation (P&O) est utilisée pour maximiser la puissance de sortie d'un générateur photovoltaïque en ajustant la tension (V_{pv}) ou le rapport cyclique du convertisseur DC-DC. Cette méthode consiste à appliquer une petite perturbation à la tension de sortie ou à ajuster directement le rapport cyclique, puis à observer l'effet de cette perturbation sur la puissance de sortie (P_{pv}). La figure II.13 illustre l'évolution de la puissance en fonction de la tension.

En analysant les variations de puissance en fonction de la tension, il est possible de déterminer la position du point de fonctionnement par rapport au point de puissance maximale (PPM). Si une augmentation de tension entraîne une augmentation de puissance, cela indique que le point de fonctionnement se situe à gauche du PPM. En revanche, si la puissance diminue, cela signifie que le système a dépassé le PPM. Une analyse similaire peut être effectuée lorsque la tension diminue. [40]

En utilisant ces observations, la commande MPPT P&O permet de déterminer la direction appropriée pour faire converger le point de fonctionnement vers le maximum de puissance, en ajustant la tension ou le rapport cyclique en conséquence. Cette approche permet d'optimiser la production d'énergie du générateur photovoltaïque en maintenant le système au point de puissance maximale, même en présence de variations des conditions d'éclairage solaire. [41]

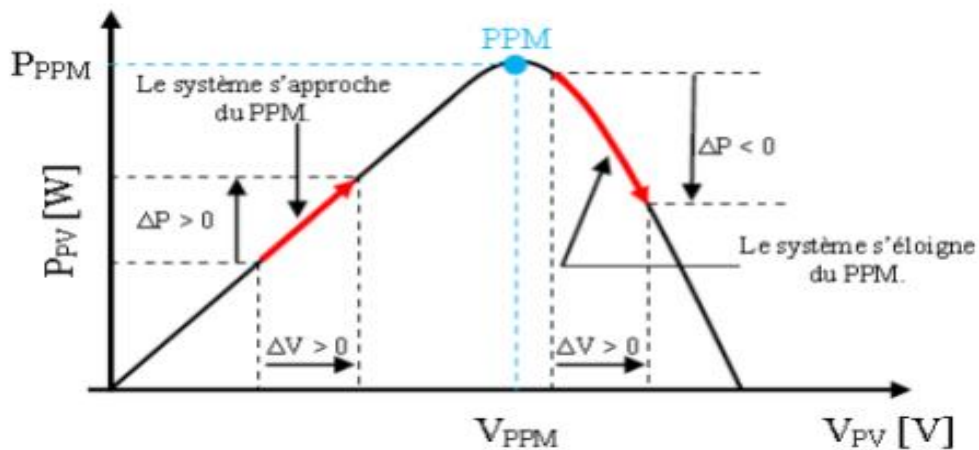


Figure II.13: Schéma du principe de la méthode P&O

Si la puissance actuelle $P(k)$ est supérieure à la valeur précédente $P(k-1)$, la direction de perturbation utilisée précédemment est maintenue. Cela signifie que si la puissance augmente, la commande MPPT continue dans la même direction de perturbation. En revanche, si la puissance diminue, la perturbation est inversée par rapport au cycle précédent. [42]

De manière similaire, si une augmentation de tension entraîne une augmentation de la puissance PV, la direction de perturbation est conservée. Cependant, si la puissance diminue avec une augmentation de tension, la direction de perturbation est inversée. Cette inversion permet de réorienter la convergence du point de fonctionnement vers le nouveau point de puissance maximale.

En utilisant cette approche adaptative, la commande MPPT est en mesure de rechercher activement le point de puissance maximale en ajustant la tension ou le rapport cyclique du convertisseur DC-DC, même lorsque les conditions d'éclairement solaire varient. [43]

II.7.2.1. L'organigramme de l'algorithme de perturbation et de l'observation (P&O) :

L'organigramme de l'algorithme de perturbation et d'observation (P&O) est un diagramme qui représente les étapes et les décisions prises par l'algorithme pour suivre le point de puissance maximale (PPM) dans un système photovoltaïque. Il est composé de différentes étapes et boucles de rétroaction, comme illustré dans la figure correspondante Figure II.14

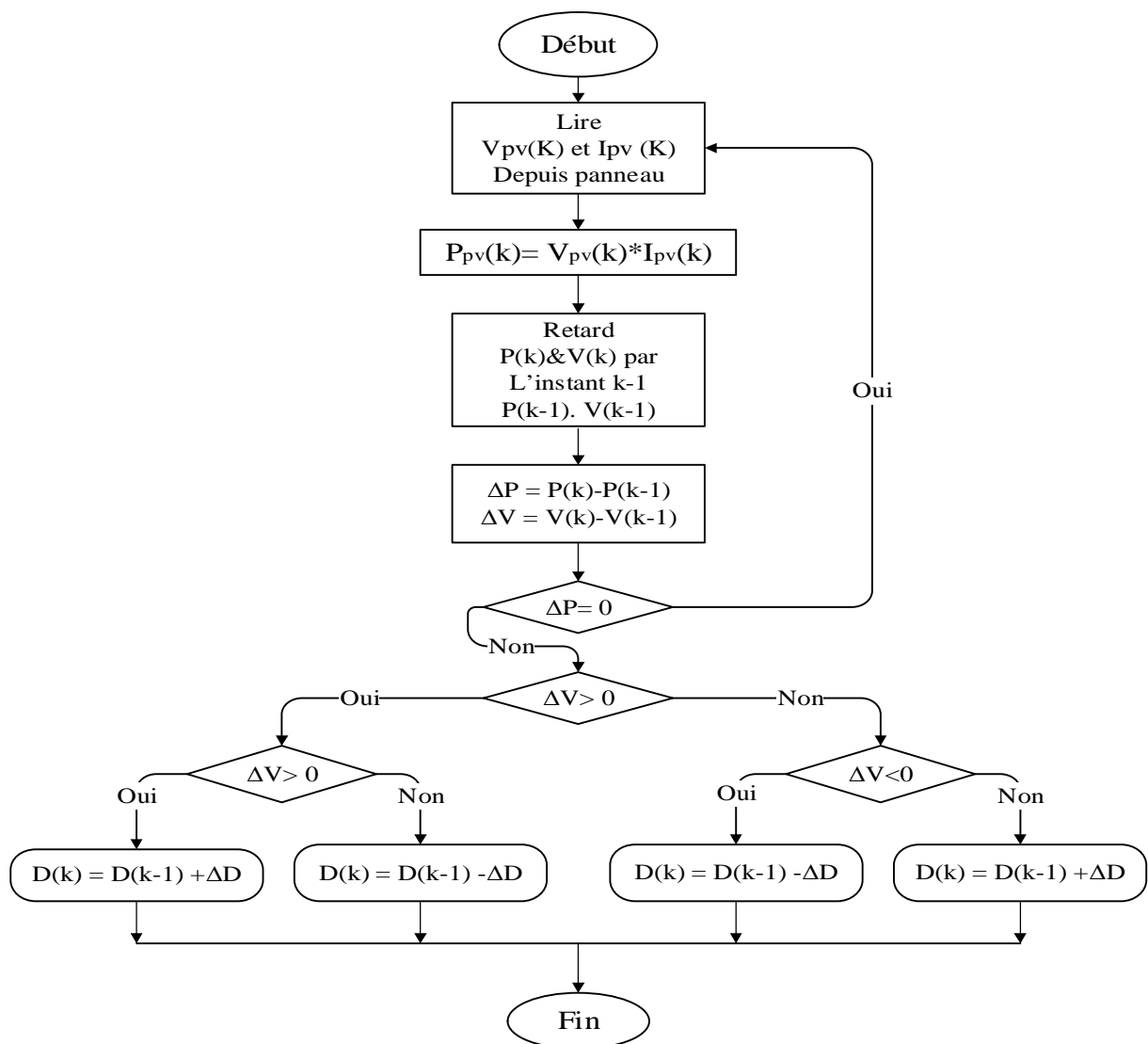


Figure II.14: Algorithme de perturbation et de l'observation(P&O)

Les régulateurs PPM sont largement utilisés pour optimiser le fonctionnement des systèmes photovoltaïques. Ce type de contrôle repose sur l'ajustement automatique du rapport cyclique

(D) afin d'atteindre la valeur optimale permettant de maximiser la puissance produite par le générateur photovoltaïque (GPV). Dans cette optique, nous examinerons l'algorithme de contrôle le plus répandu, à savoir le P&O.

II.7.2.2. Avantages et inconvénients de la méthode perturbée et observe

La méthode perturbée et observe (ou "P&O") est une technique couramment utilisée dans les systèmes de régulation du suivi du point de puissance maximale (MPPT) des panneaux solaires. Voici quelques avantages et inconvénients de cette méthode : [44]

❖ **Avantages de la méthode perturbée et observe (P&O) :**

- ✓ Simplicité : La méthode P&O est relativement simple à mettre en œuvre, ce qui en fait une option pratique pour de nombreux systèmes solaires.
- ✓ Efficacité : Dans des conditions idéales, la méthode P&O peut permettre de suivre efficacement le point de puissance maximale d'un panneau solaire, ce qui optimise la production d'énergie.
- ✓ Coût réduit : Étant donné sa simplicité, la méthode P&O est souvent moins coûteuse à mettre en place par rapport à d'autres techniques plus complexes de suivi du MPPT.

❖ **Inconvénients de la méthode perturbée et observe (P&O) :**

- ✓ Sensibilité aux variations de conditions : La méthode P&O peut être sensible aux variations rapides des conditions d'ensoleillement, ce qui peut entraîner des pertes de puissance et une instabilité de suivi du MPPT.
- ✓ Oscillations : Dans certaines situations, la méthode P&O peut entraîner des oscillations autour du point de puissance maximale, ce qui peut affecter l'efficacité globale du système.
- ✓ Résistance variable : La méthode P&O suppose généralement une résistance constante dans le système, ce qui peut ne pas être le cas dans certaines configurations de panneaux solaires.

Il convient de noter que la méthode P&O est l'une des nombreuses techniques de suivi du MPPT disponibles, et chaque méthode présente ses propres avantages et inconvénients. Le choix de la méthode appropriée dépend des spécificités du système solaire et des exigences de performance. [45]

Nous avons testé le fonctionnement du système étudié sous une température fixe de 25°C et un éclairage variable (600W/m², 1000W/m², 300W/m²,) comme illustré dans la figure suivante

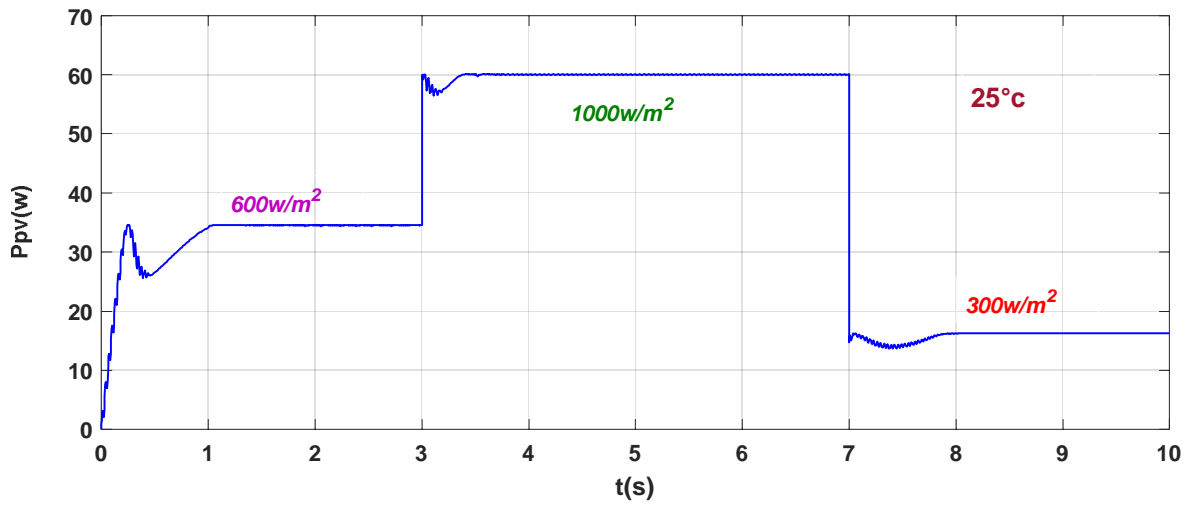


Figure II.15: Diagramme fonctionnement du système PV (Ppv, T)

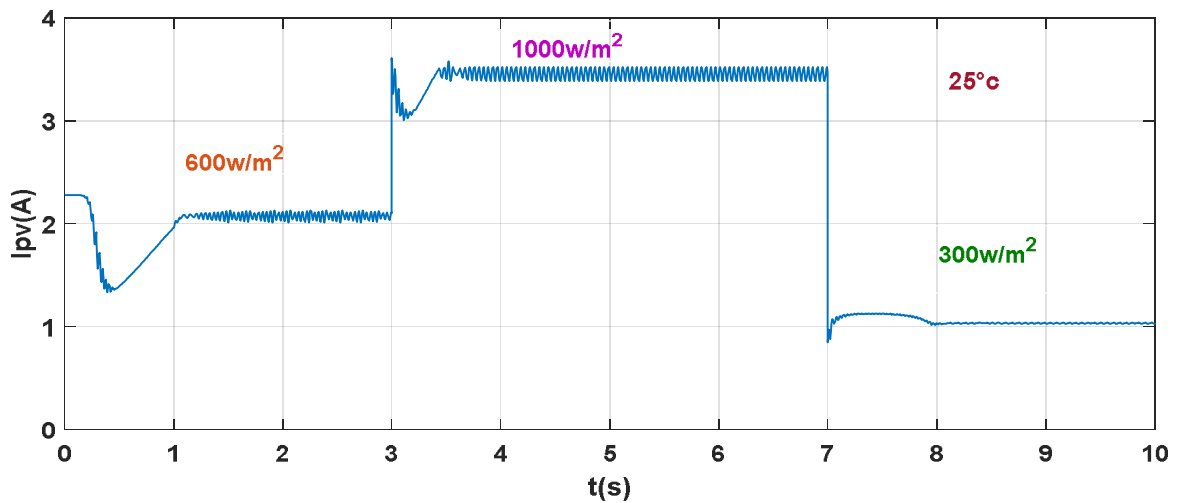


Figure II.16: Diagramme fonctionnement du système PV (Ipv, T)

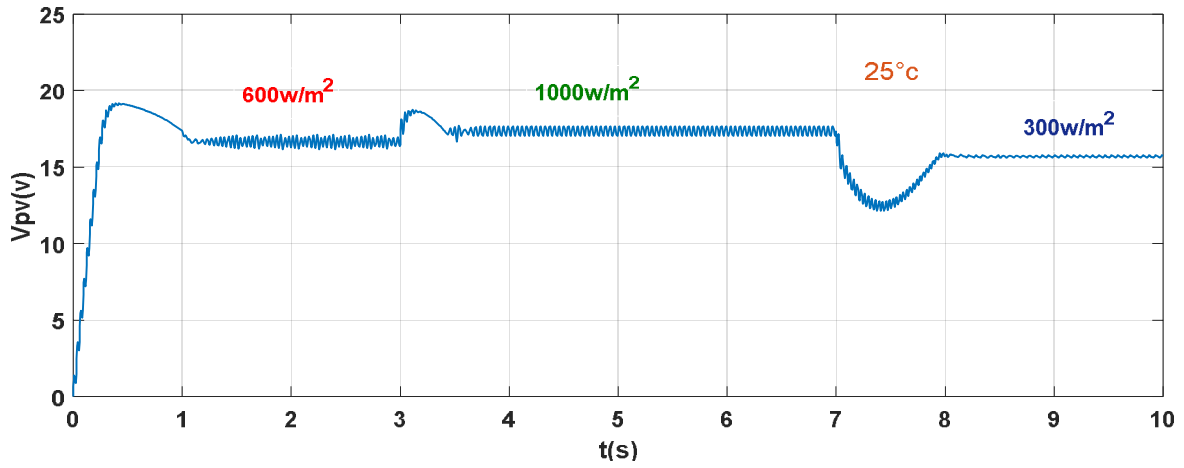


Figure II.17: Diagramme fonctionnement du système PV (V_{pv} , T)

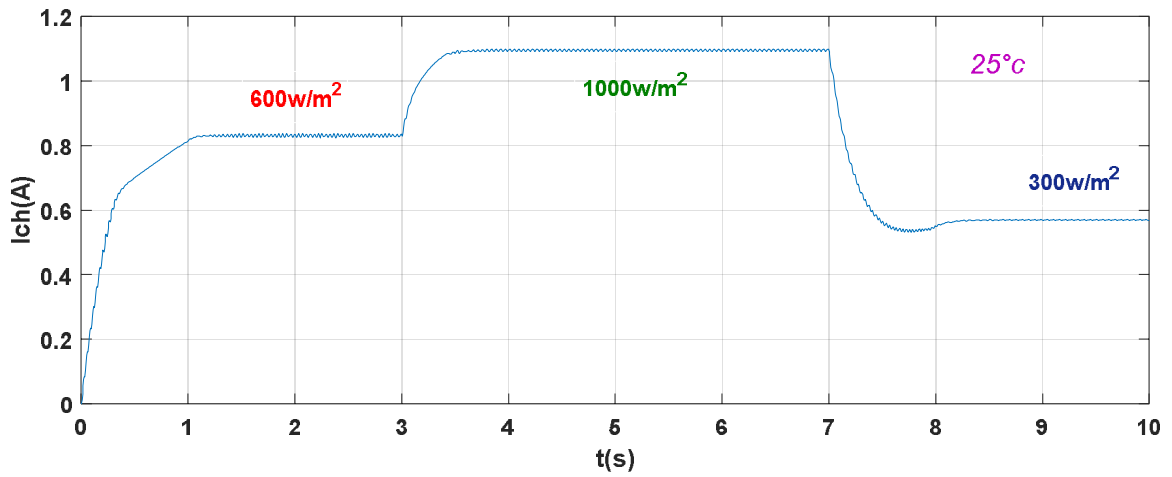


Figure II.18: Diagramme fonctionnement du système PV (I_{ch} , T)

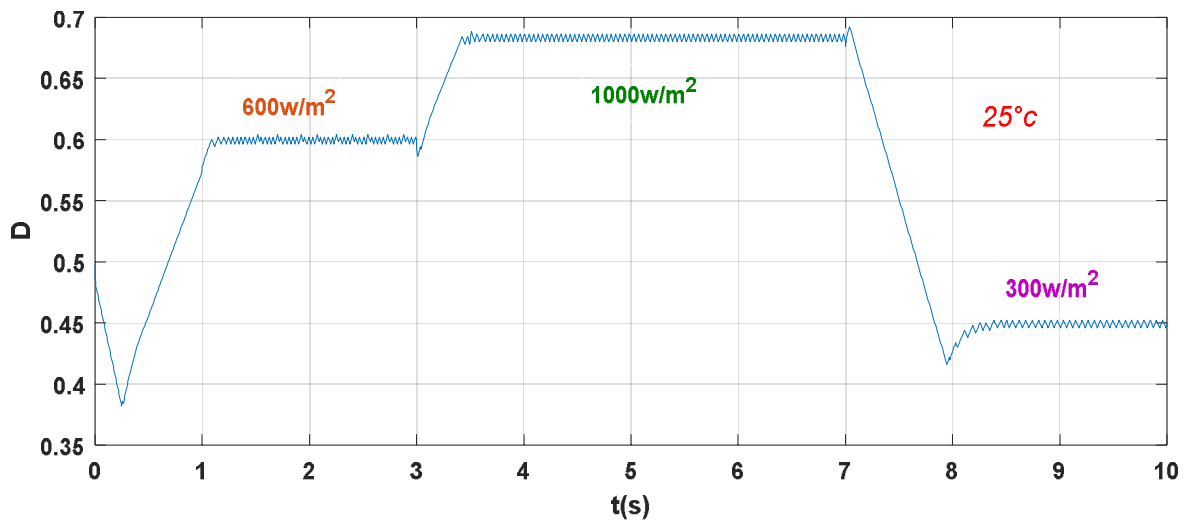


Figure II.19: Diagramme fonctionnement du rapport cyclique (D)avec (t)

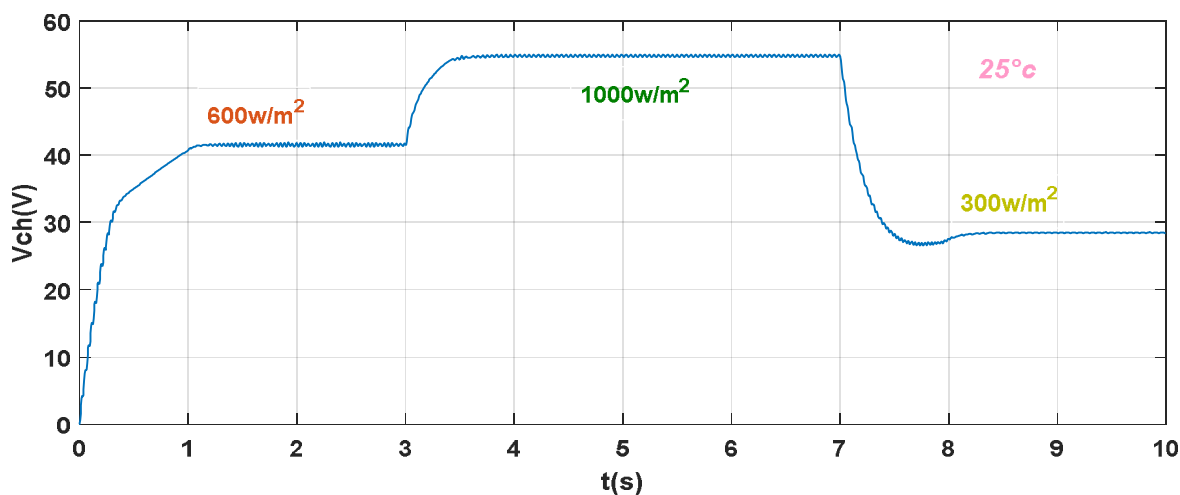


Figure II.20: Diagramme fonctionnement du système PV (V_{ch} , T)

Les graphiques présentés mettent en évidence l'impact direct de l'éclairement solaire sur les performances du système photovoltaïque, y compris les variations de puissance, de tension, de courant et de rapport cyclique. Ces variations sont directement influencées par l'intensité du rayonnement solaire. De manière générale, une augmentation de l'éclairement solaire entraîne une augmentation de la puissance de production, de la tension de sortie, du courant généré et du rapport cyclique. Ces observations soulignent l'importance de tenir compte des conditions d'éclairement solaire lors de la conception et de l'optimisation des systèmes photovoltaïques afin d'assurer des performances optimales et une efficacité énergétique maximale.

II.8. Conclusion

En conclusion de ce chapitre, nous avons examiné en détail le fonctionnement du convertisseur photovoltaïque et nous avons effectué la modélisation des cellules solaires. Nous avons également abordé les différents types de diodes et leurs avantages et inconvénients. De plus, nous avons étudié la modélisation du transformateur Boost dans le cadre de la conversion photovoltaïque.

En utilisant un modèle simplifié à une seule diode, nous avons facilité l'intégration de composants supplémentaires tels que le convertisseur, la charge et le contrôle MPPT. En particulier, nous avons exploré la méthode P&O pour le contrôle MPPT, qui nous a permis d'optimiser l'efficacité de la conversion photovoltaïque.

Nous avons remarqué la grande importance du rayonnement solaire sur les performances du système photovoltaïque

L'approche adoptée dans ce chapitre nous a permis de présenter les résultats de manière claire, précise et systématique. En comprenant les principes fondamentaux, en modélisant les composants et en explorant des méthodes de contrôle efficaces, nous sommes en mesure d'améliorer la performance et l'efficacité des systèmes de conversion photovoltaïque.

Chapitre III: Modélisation de sous système de stockage et gestion d'énergie

III.1. Introduction

Le présent chapitre se focalise sur l'étude de la modélisation du convertisseur Buck-Boost et son intégration avec une batterie dans un système photovoltaïque. Nous analysons également l'importance de la régulation de la tension du bus DC au sein du système photovoltaïque, en mettant en avant son application pratique dans MATLAB Simulink. La gestion de la puissance dans un système PV vise à optimiser la production, la conversion, la distribution et l'utilisation de l'énergie solaire afin de répondre aux besoins de consommation. L'objectif principal de ce chapitre est de développer une base solide de connaissances sur ces systèmes, permettant ainsi une analyse approfondie de leurs performances.

III.2. Description du système étudié

Le système étudié comprend un générateur photovoltaïque (GPV), qui est relié au bus DC via un convertisseur élévateur DC-DC. Le convertisseur fonctionne de manière optimale, permettant au GPV de suivre le point de puissance maximale (MPPT). De plus, une batterie de stockage est connectée au bus DC via un convertisseur Buck-Boost bidirectionnel. L'ensemble du système alimente une charge DC résistive. [46]

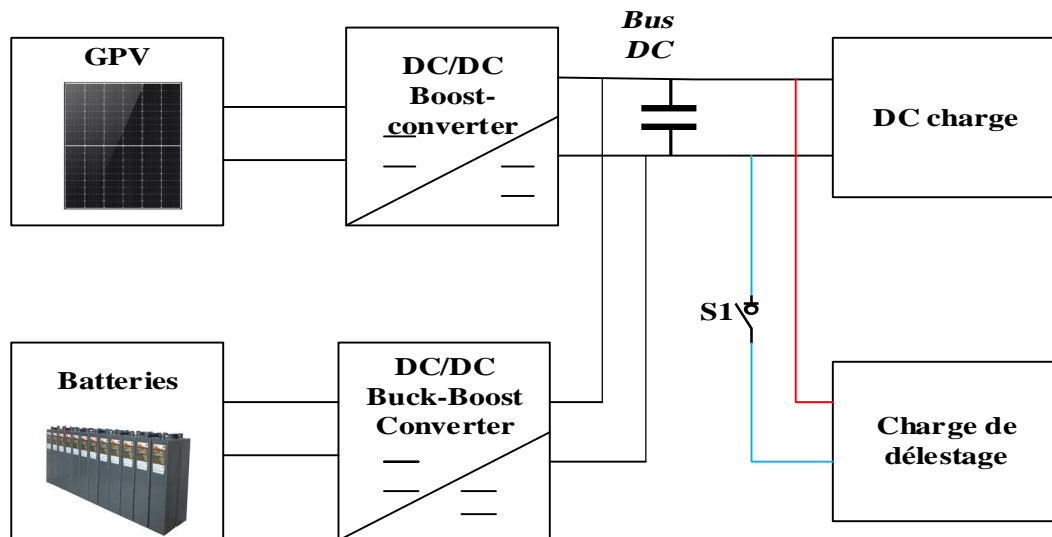


Figure III.1: Système photovoltaïque avec batteries de stockage

III.3. Modélisation du convertisseur Buck-Boost

Le convertisseur Buck-Boost bidirectionnel avec deux commutateurs est un dispositif électronique utilisé pour réguler la tension et le courant en inversant la direction du flux d'énergie. Il utilise deux commutateurs, un commutateur de commande et un commutateur de réversion, pour contrôler la direction du courant. En mode "buck", la tension de sortie est inférieure à la tension d'entrée, tandis qu'en mode "boost", la tension de sortie est supérieure à la tension d'entrée. Ce convertisseur offre une régulation précise, une réversibilité du courant et une efficacité élevée de conversion d'énergie. Il trouve des applications dans les systèmes de stockage d'énergie, les systèmes de charge de batteries et les systèmes de gestion d'énergie. La modélisation et l'étude de ce convertisseur permettent de comprendre son fonctionnement, d'analyser ses performances et de l'optimiser pour répondre aux besoins spécifiques des systèmes énergétiques. [47]

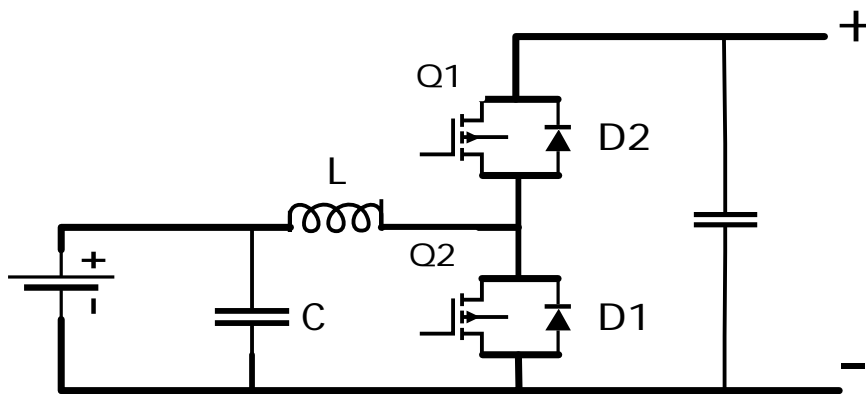


Figure III.2: convertisseur Buck-Boost bidirectionnel avec deux commutateurs

III.3.1. Mode de fonctionnement du convertisseur Buck-Boost

Le convertisseur du GPV facilite le transfert de puissance dans une seule direction des sources vers le bus DC. Cependant, lorsqu'il s'agit de charger et de décharger la batterie, un convertisseur réversible est nécessaire. Un convertisseur abaisseur-élevateur bidirectionnel, comme le montre la Figure (III.2), peut réaliser une réversibilité de puissance grâce à ses commutateurs qui sont conçus pour transférer efficacement le courant dans les deux sens. Il en résulte deux modes de fonctionnement distincts. [48]

III.3.1.1. Mode de charge (fonctionnement en Buck mode) :

Pendant de la charge de la batterie, le convertisseur bidirectionnel fonctionne comme un convertisseur Buck. Dans ce mode, le commutateur S1 et la diode D1 sont activés, tandis que le commutateur S2 et la diode D2 sont désactivés. (Figure III.3-B). Au fur et à mesure que le cycle progresse, le courant de l'inductance diminue et l'énergie stockée dans l'inductance L est utilisée pour charger la batterie. De plus, chaque fois qu'il y a un surplus de production d'énergie renouvelable, le convertisseur bidirectionnel transfère la puissance supplémentaire du bus DC à la batterie. [49]

III.3.1.2. Mode de décharge (fonctionnement en Boost mode) :

Pendant la décharge de la batterie, le convertisseur bidirectionnel fonctionne comme un convertisseur élévateur. Cela signifie que le commutateur S2 et la diode D2 sont activés, tandis que le commutateur S1 et la diode D1 sont tous deux désactivés, comme illustré à la figure 4. (Figure III.3 -A). Le rôle du convertisseur dans ce mode est de transférer l'énergie de la batterie vers le bus DC. Cependant, dans les situations où la production d'énergie renouvelable est insuffisante, le convertisseur bidirectionnel régule le flux d'énergie et maintient la tension du bus CC dans les modes de charge et de décharge. [50]

La figure (III.2) montre les deux schémas équivalents du convertisseur Buck-Boost pour les deux périodes de fonctionnement.

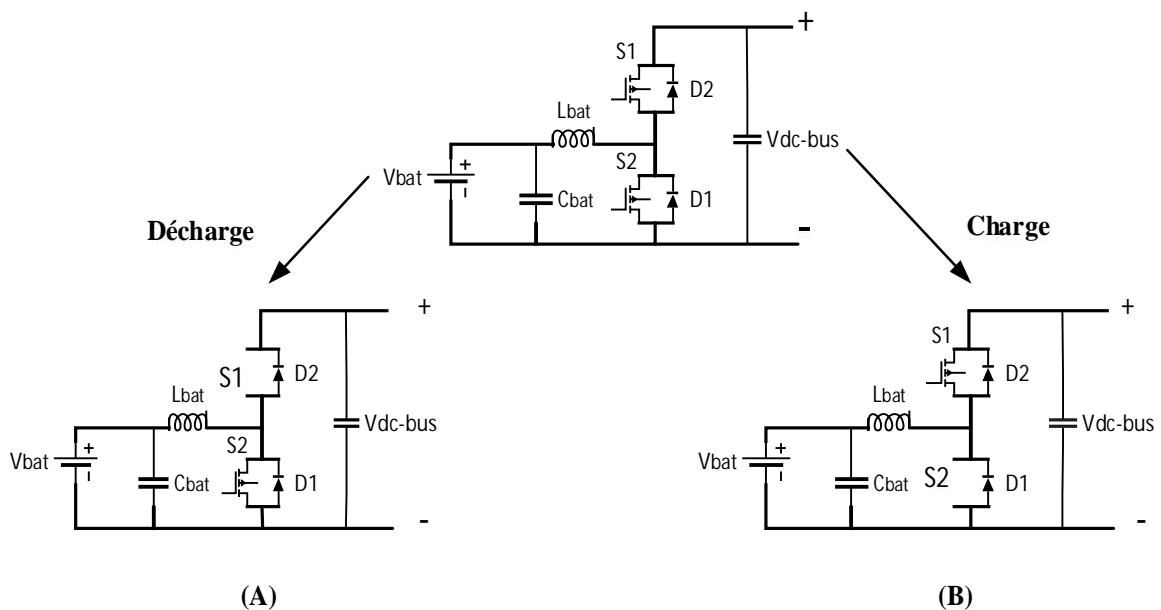


Figure III.3: Circuits équivalents de Buck-Boost, (A) : Boost mode, (B) : Buck mode.

Ainsi, le convertisseur bidirectionnel joue un rôle essentiel dans la gestion de l'énergie, permettant une utilisation efficace de l'énergie renouvelable en ajustant le flux de puissance entre la batterie et le bus DC en fonction des besoins du système.

III.3.2. Le mode mathématique

À noter que la commande des interrupteurs Q1 et Q2 est réalisée simultanément avec deux signaux (rapports cycliques) complémentaires u et $1-u$. Le modèle du convertisseur bidirectionnel est donné par le système d'équations (III.1) : [51].

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_L = \frac{1}{L} [v_{bat} - (1-u)v_{bus}] \\ \frac{d}{dt} v_{bus} = \frac{1}{C_{bus}} [(1-u)i_L - i_0] \end{cases} \quad (\text{III. 1})$$

i_L : la tension d'inductance. V_{bat} : tension de batterie. C_{bat} : capacité de batterie

Le convertisseur bidirectionnel que nous avons choisi fonctionne comme convertisseur élévateur pour décharger la batterie et comme convertisseur abaisseur pour charger

III.4. Modélisation de stockage :

Étant donné la diversité des types de batteries et la multitude de paramètres impliqués, il est courant d'utiliser une représentation empirique du comportement de la batterie. Dans le cadre d'une installation photovoltaïque, les batteries d'accumulateurs au plomb sont fréquemment utilisées comme système de stockage. Pour notre étude, nous avons choisi d'utiliser un modèle spécifique, à savoir le modèle de batterie au plomb-acide. [52]

III.4.1. Modèle de la batterie en mode de charge :

Lorsque la puissance générée par le générateur photovoltaïque est supérieure à la demande de charge, les batteries se chargent et leur capacité à l'instant t peut être représentée en fonction

$$C_{Bat}(t) = C_{Bat}(t-1) * (1 - \sigma) + (P_{pv}(t) - P_L(t) / \eta_{inv}) * \eta_{Bat} \quad (\text{III. 2})$$

$C_{Bat}(t)$ et $C_{Bat}(t-1)$ sont les quantités de la charge et la décharge des batteries au temps (t) et $(t-1)$ respectivement, σ est le taux horaire de la charge spontanée, P_{pv} est la puissance du générateur PV, P_L est la charge demandée au temps t , η_{ond} et η_{Bat} sont les rendements de l'onduleur et de la batterie successivement.

Lors de la charge de la batterie, son rendement varie entre 0,65 et 0,85 en fonction du courant de charge. En revanche, lors du processus de décharge, le rendement de la batterie est considéré comme étant égal à 1.

III.4.2. Modèle de la batterie en mode de décharge:

Lorsque la demande de charge dépasse la puissance produite, la capacité des batteries à l'instant t peut être formulée de la manière suivante : [53]

$$C_{Bat}(t) = C_{Bat}(t - 1) * (1 - \sigma) + (P_L(t)/\eta_{inv} - P_{pv}(t)) \quad (III. 3)$$

À tout moment, la quantité de charge des batteries est soumise aux contraintes suivantes :

$$C_{Bat\ min} \leq C_{Bat}(t) \leq C_{Bat\ max} \quad (III. 4)$$

La capacité de stockage dépend de la charge demandée et de l'autonomie souhaitée. Elle peut être estimée à l'aide de la relation suivante

$$C_{Bat} = \frac{E_L * N_a}{\eta_{Bat} * F_{déch} * DOD} [Wh] \quad (III. 5)$$

$$C_{Bat} [Ah] = \frac{C_{Bat} [Wh]}{V_a} \quad (III. 6)$$

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

N_a : Le nombre de jours d'autonomie.

V_a : La tension du système.

DOD : La profondeur de décharge.

III.4.3. La tension de la batterie :

Le modèle ci-dessous établit une corrélation entre la tension, le courant et l'état de charge. Ce modèle est dérivé du schéma électrique illustré dans la figure (III.5). [54]

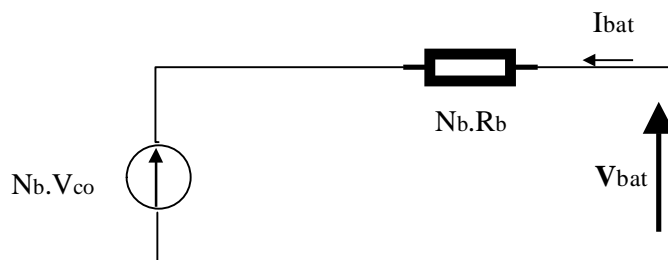


Figure III.4: Le Schéma électrique de batterie.

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

$$V_{bat}(t) = n_b * V_{co}(t) + n_b * I_{bat}(t) * R_{bat}(t) \quad (III. 7)$$

Où $V_{bat}(t)$ est la tension de circuit ouvert au temps t , v ; et $R_{bat}(t)$ est la résistance interne de batterie, Ohms ; la tension de circuit ouvert est exprimée comme un logarithme de la fonction de l'état de charge

$$V_{co} = VF + b * \log(SOC(t)) \quad (III. 8)$$

Dans cette équation, VF représente la force électromotrice et b est une constante empirique utilisée dans le modèle.

La variation de V_{co} en fonction de l'état de charge (SOC) est représentée par la figure suivante

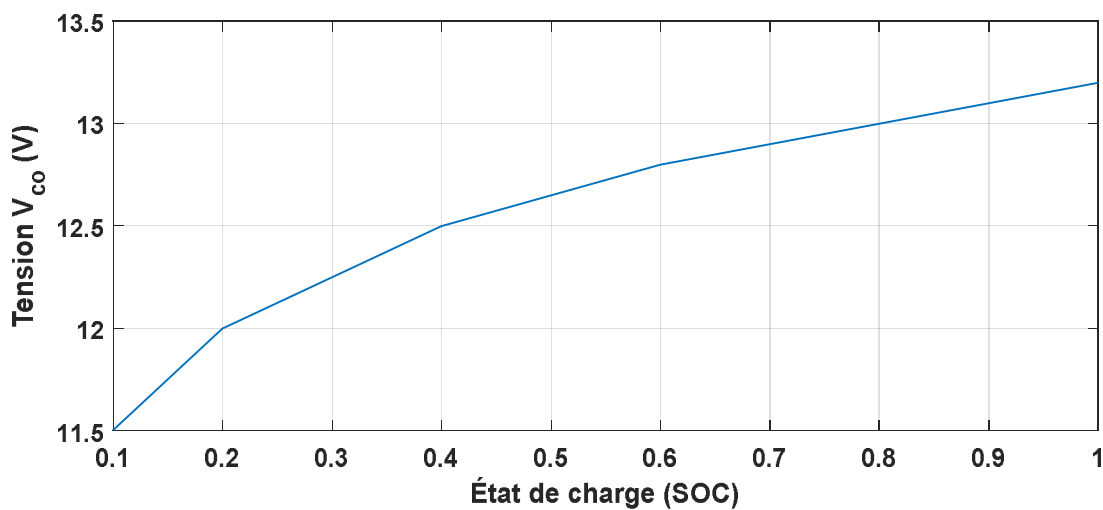


Figure III.5: La variation de V_{co} en fonction de l'état de charge (SOC)

III.4.4. Courant de batterie :

Quand la puissance du générateur PV est plus grande que la charge, les batteries sont à l'état de charge, le courant de charge des batteries au temps (t) peut être décrit par : [55]

$$I_{Bat} = \frac{P_{pv}(t)}{V_{Bat}(t)} - \frac{E_L(t)/\eta_{inv}}{V_{Bat}(t)} \quad (III. 9)$$

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

$$I_{Bat} = \frac{E_L(t)/\eta_{inv}}{V_{Bat}(t)} - \frac{P_{pv}}{V_{Bat}(t)} \quad III. 10)$$

III.4.5. Rendement de la Batterie :

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

$$\eta_{bat} = \frac{P_{fourni}}{P_{incid}} \quad (\text{III. 11})$$

En pratique, en considérant un rendement constant de 85 %, une tension nominale de 12 V et une capacité 100 Ah, la puissance fournie par une batterie peut être calculée de la manière suivante :

$$P_{fourni} = \eta_{bat} * P_{incid} \quad (\text{III. 12})$$

P_{incid} : Puissance du générateur

Tableau III.1: Caractéristiques de la batterie

tension nominal	12V
tension de charge maximale	13.7V
Voltage limité	14.1 V
tension minimale de décharge	12V
tension maximale de décharge	11.2V
capacité nominale	100A/h
coefficient de décharge	0.0001

III.5. Régulation de la tension du bus continu :

La batterie est connectée au bus continu à l'aide d'un convertisseur Buck/Boost, Le banc de batteries est utilisé pour fournir de l'énergie à la charge pendant de courtes périodes, notamment lors de fluctuations d'irradiation ou de transitions.

Le contrôle de la tension du bus continu est assuré par un système de stockage composé d'une batterie connectée au bus DC via un convertisseur DC-DC abaisseur-élévateur (buck-boost). Ce système de stockage joue un rôle crucial dans la gestion de la puissance en permettant de stocker l'excès d'énergie provenant des sources renouvelables (PV) et de contribuer à la fourniture d'énergie électrique lorsque la demande dépasse la production. [56]

Pour maintenir la tension à une valeur de référence spécifique, indépendamment des variations des conditions de fonctionnement, un contrôleur PI est utilisé, basé sur une fonction de transfert du bus continu. $\frac{1}{c.s}$

L'objectif principal du convertisseur de la batterie est de maintenir la tension V_{dc} aux bornes du bus continu égale à une valeur de référence $V_{dc ref}$

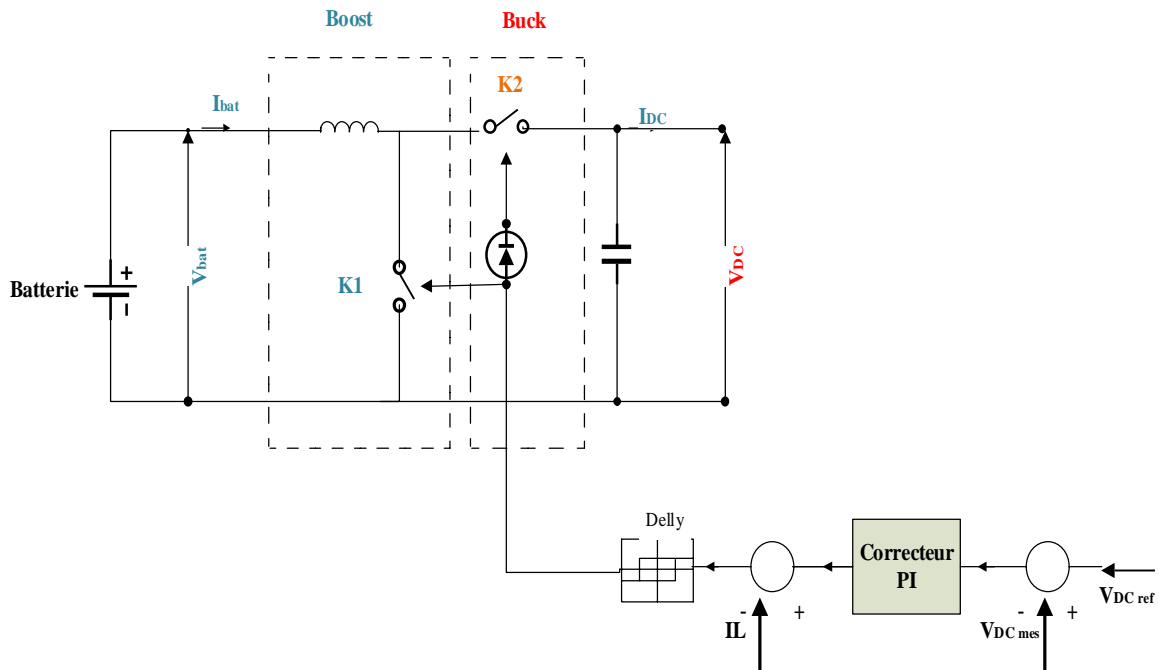


Figure III.6: Principe de la régulation du bus continu.

La régulation du bus continu et de la batterie peut être réalisée en utilisant un régulateur PI. Le signal de sortie de ce régulateur est un courant de référence qui est comparé au courant de la batterie. Grâce à un régulateur à hystérésis, le rapport cyclique de l'hacheur réversible en courant est contrôlé. [57]

III.6. Algorithme de gestion de puissance du système Photovoltaïque

Pour gérer l'énergie électrique générée par le système Photovoltaïque, nous avons besoin d'un superviseur, qui doit optimiser l'usage de l'énergie produite et celui de la batterie. Si les sources renouvelables ne donnent pas suffisamment de puissance et si la capacité de la batterie est suffisante (l'état de charge $SOC > SOC_{min}$), la batterie fournira alors la puissance manquante (mode de déchargé, jusqu'au à la limite précise au-delà le délestage de système est indispensable pour lui protégé. Par contre, si la puissance GPV dépasse la demande de la charge, l'excédent sera stocké dans la batterie (mode de charge) et si celle-ci est pleine ($SOC > SOC_{max}$), le surplus sera dissipé dans un système de délestage résistive au basculer au mode MPP Limité (LMPP) comme il a été expliqué dans la référence [58]. Ainsi, la batterie n'est pas le fournisseur principal, son taux de charge/décharge est réduit, et donc la durée de vie de la batterie est prolongée.

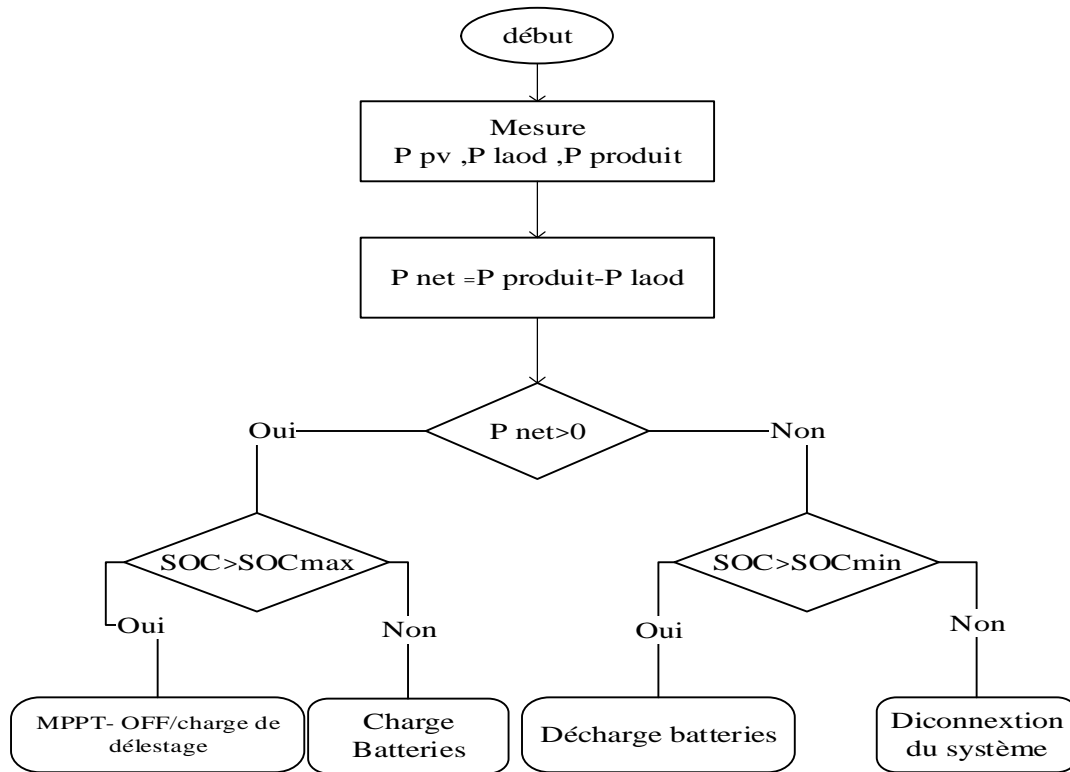
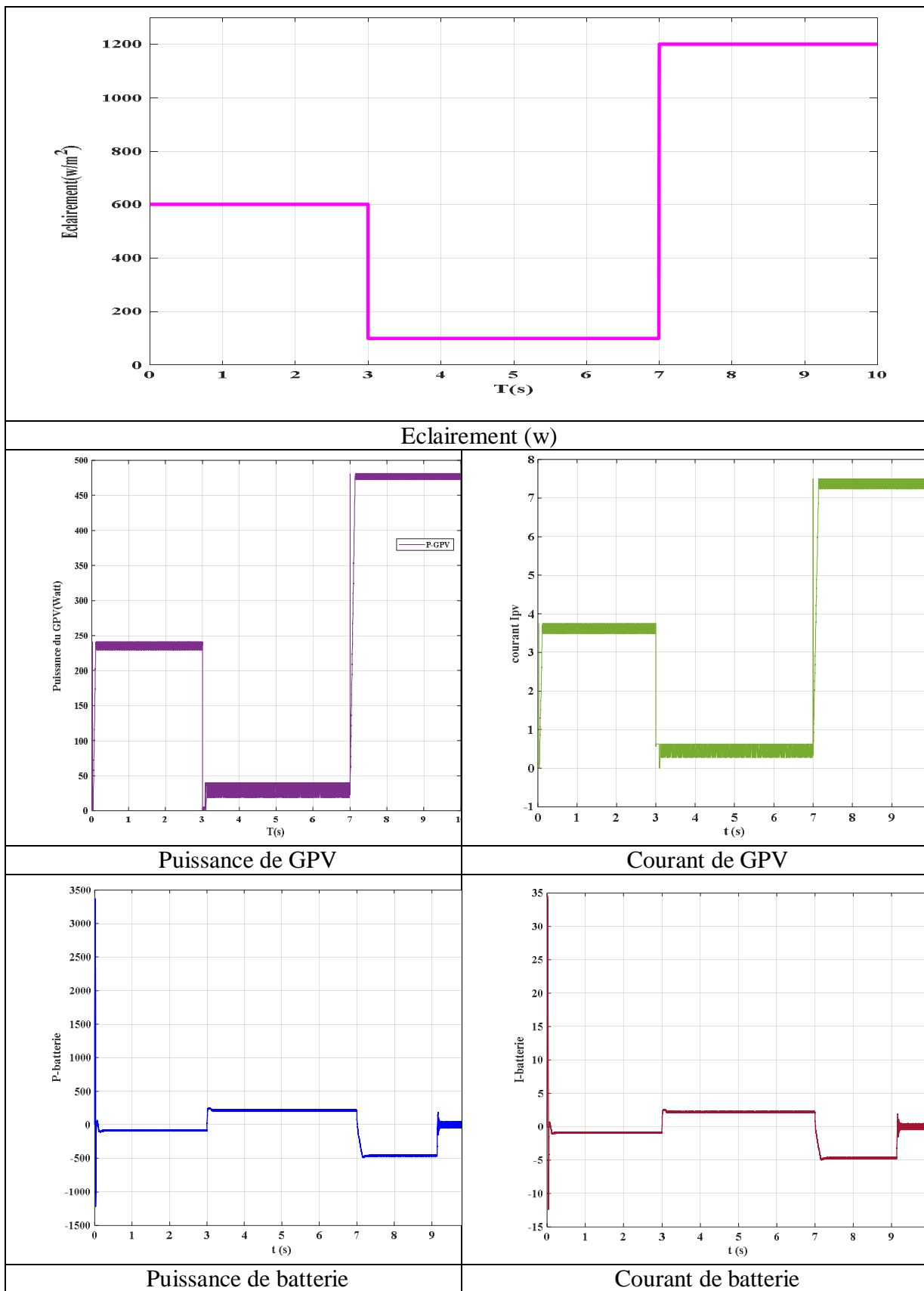


Figure III.7: Organigramme de l'algorithme de gestion de puissance du système Photovoltaïque

III.7. Résultats de simulation :

Dans notre étude, nous avons utilisé MATLAB Simulink pour analyser les performances d'un système de générateur photovoltaïque comprenant une charge résistive et une batterie de stockage. Le modèle Simulink intègre des transducteurs, des algorithmes de contrôle et des blocs de mise à l'échelle pour représenter le comportement du système. Nous avons d'abord examiné la régulation de la tension du bus continu, puis évalué la gestion globale du système. Les résultats obtenus avec différentes valeurs de référence de tension de bus continu démontrent l'efficacité du correcteur utilisé pour contrôler la tension.



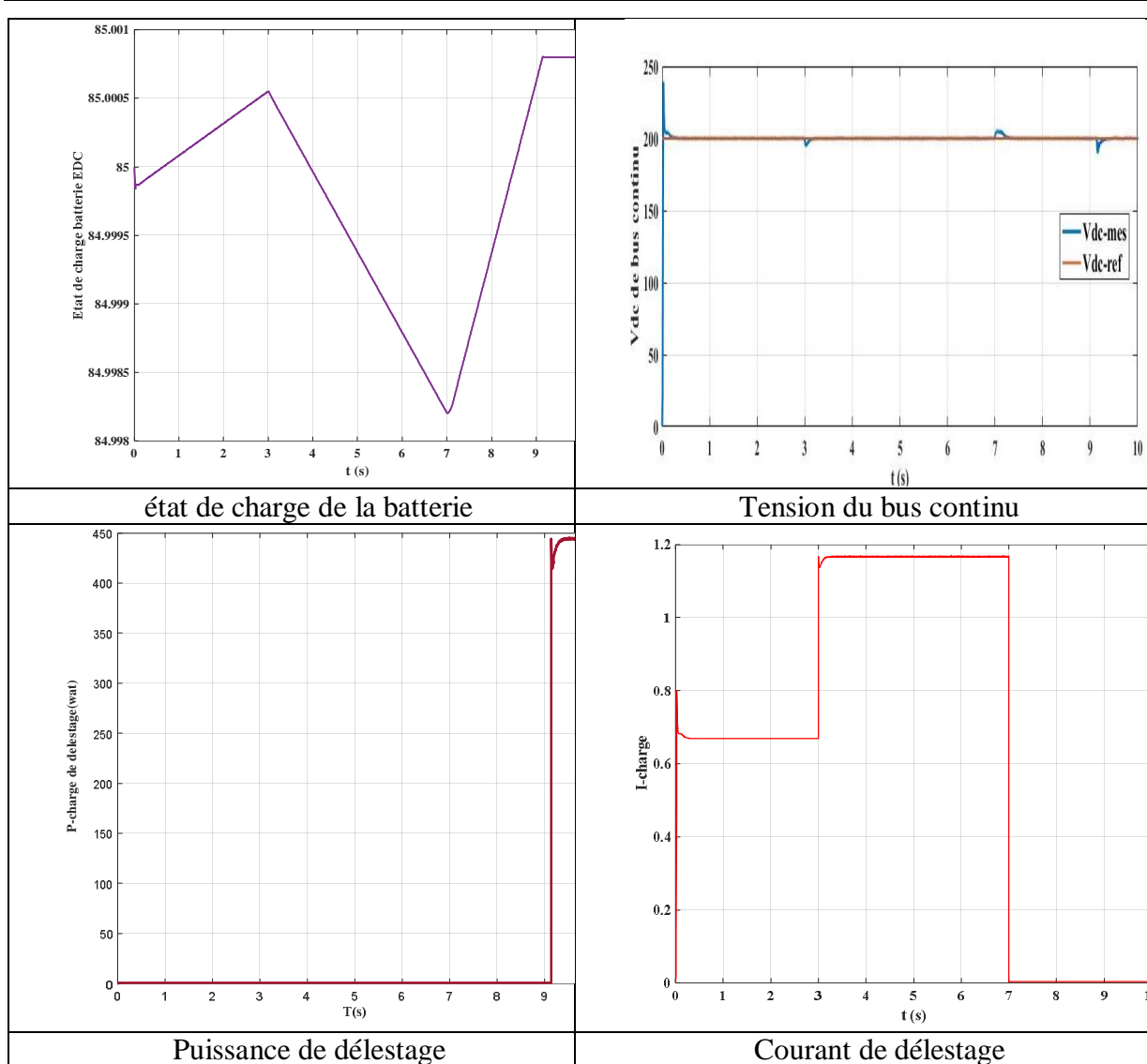


Figure III.8 : Résultats simulation

Dans la première étape, on remarque un changement de Eclairage a la valeur de 600 au temps 3, puis elle diminue à 100 jusqu'au temps 7 secondes, et elle remonte à 1200 jusqu'au temps 10 secondes.

Dans la deuxième étape, nous remarquons un changement dans la Puissance de GPV, puisqu'elle change lorsque l'Eclairage est de 600, diminue à 100, puis augmente à 1200.

Le courant de GPV est de 3,8 ampères à 240 watts, puis diminue à 0,5 ampères à 50 watts, puis remonte à 7,5 ampères à 480 watts. D'après ce que l'on remarque, dès que l'éclairage est bon, le rendement énergétique est bon

Dans la troisième étape, nous remarquons le changement de Puissance et de Courant de la batterie, où elle est en **mode de charge** jusqu'à ce que le temps soit de 3 secondes, puis elle passe en **mode de décharge** en raison du changement d'Eclairage à 100 jusqu'au moment est

7, puis il passe en **mode de charge** jusqu'à ce que le temps soit de 9,2 secondes, puis on remarque qu'il y a un état de saturation

Dans la quatrième étape, on constate que la charge de la batterie est en **mode de charge** jusqu'à l'instant 3, puis on constate une diminution significative de l'étape de décharge jusqu'à l'instant 7, puis une nouvelle remontée de l'état de charge jusqu'à l'instant 9.2 où la saturation, et on note ici une stabilité à ce moment

Quant à la Tension du bus continu, on note qu'elle conserve sa valeur des temps précédents avec une légère variation estimée à 0,17 seconde, ce qui indique que le système fonctionne avec un bon suivi.

Dans la Cinquième étape, lorsque la batterie atteint sa capacité maximale, le système passe rapidement en **mode de délestage** pour protéger la batterie contre la surcharge. On constate que la puissance de délestage passe de 0 à 440W en 9,2 secondes. Cette fonction de délestage est nécessaire pour éviter la saturation de la batterie et assurer son bon fonctionnement. (**Mode délestage**)

III.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la modélisation et l'intégration du convertisseur buck-boost avec des modules de batteries dans un système photovoltaïque. À l'aide de MATLAB Simulink, nous avons analysé les performances du générateur photovoltaïque et évalué la capacité du système à suivre le point de puissance maximale. Les résultats ont démontré l'efficacité des algorithmes de contrôle et des transducteurs utilisés, avec des temps de réponse rapides et constants lors des variations de tension du bus continu. De plus, nous avons intégré une fonction de délestage pour prévenir la saturation de la batterie et assurer son bon fonctionnement. La gestion de l'énergie est donc d'une importance capitale dans un système photovoltaïque pour garantir un fonctionnement optimal et fiable.

Chapitre IV: Réalisation expérimentale du système étudié

IV.1 Introduction:

Dans ce chapitre, nous allons étudier la mise en œuvre de la chaîne de conversion photovoltaïque, comprenant le générateur photovoltaïque, le convertisseur élévateur DC-DC (boost), le convertisseur buck-boost, le sous-système de stockage et les différentes boucles de régulation. L'objectif est d'assurer une gestion efficace de l'énergie dans le système, en tenant compte des variations des conditions climatiques du côté de la source et des changements d'impédance de la charge.

IV.2 Description du banc d'essai expérimental

Nous avons mis en place un système expérimental comprenant un générateur photovoltaïque de 1,5 kW avec 10 modules photovoltaïques (figure IV.1), dont un module de 150 watts. Ce générateur a été installé sur la toiture de notre laboratoire.

Le contrôle du système est assuré par une carte dSPACE1104 équipée d'un DSP TMS320F240 (20 MHz) et d'un microprocesseur PC 603e (250 MHz). Cette carte permet de commander le convertisseur élévateur (Boost) DC-DC et le convertisseur bidirectionnel élévateur-abaisseur (Buck-Boost) DC-DC. Le contrôle a été implémenté à l'aide de Matlab Simulink, avec Real-Time Workshop (RTW) convertissant automatiquement les modèles Simulink en code C chargé sur la carte dSPACE1104. Un signal PWM est généré pour contrôler l'interrupteur du convertisseur.

Le dSPACE1104 est connecté aux convertisseurs grâce à deux cartes d'interface qui reçoivent et émettent des signaux de contrôle. Les capteurs de courant et de tension utilisés sont respectivement LA55-P et LV25P (Figure IV.2). Des mesures ont été prises à l'aide de cartes d'acquisition.

Dans cette étude expérimentale, nous avons mis en place deux boucles de contrôle. La première boucle implémente l'algorithme MPPT (Maximum Power Point Tracking) perturbant et observant (P&O), qui permet d'extraire la puissance maximale du module photovoltaïque. La deuxième boucle de contrôle est chargée de réguler la tension du bus continu, ajustant ainsi la tension de sortie du convertisseur bidirectionnel élévateur-abaisseur en fonction de la valeur souhaitée. Cette régulation est réalisée en contrôlant le rapport cyclique via un régulateur PI

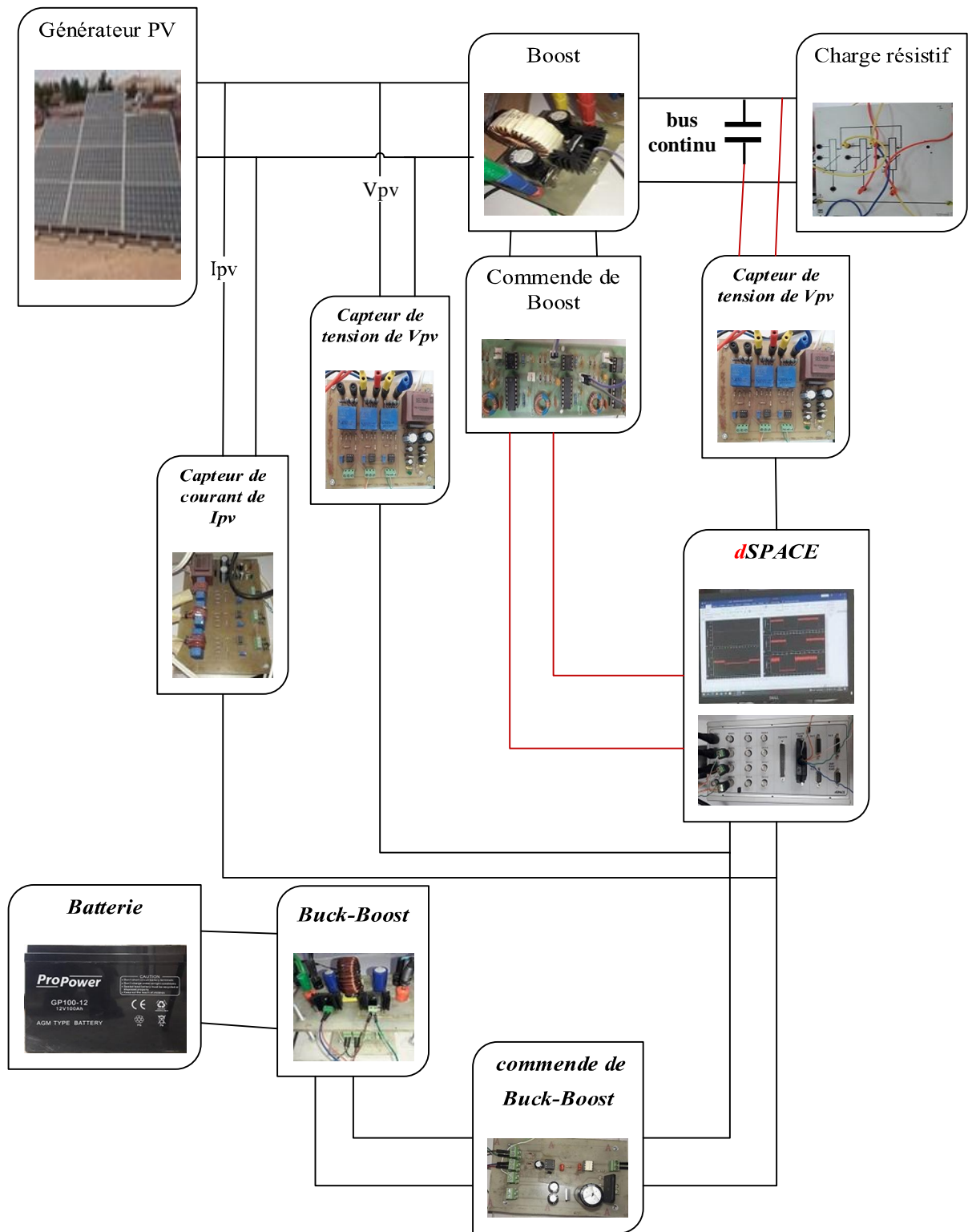


Figure IV.1: Schéma explicatif du banc d'essai expérimental du système PV

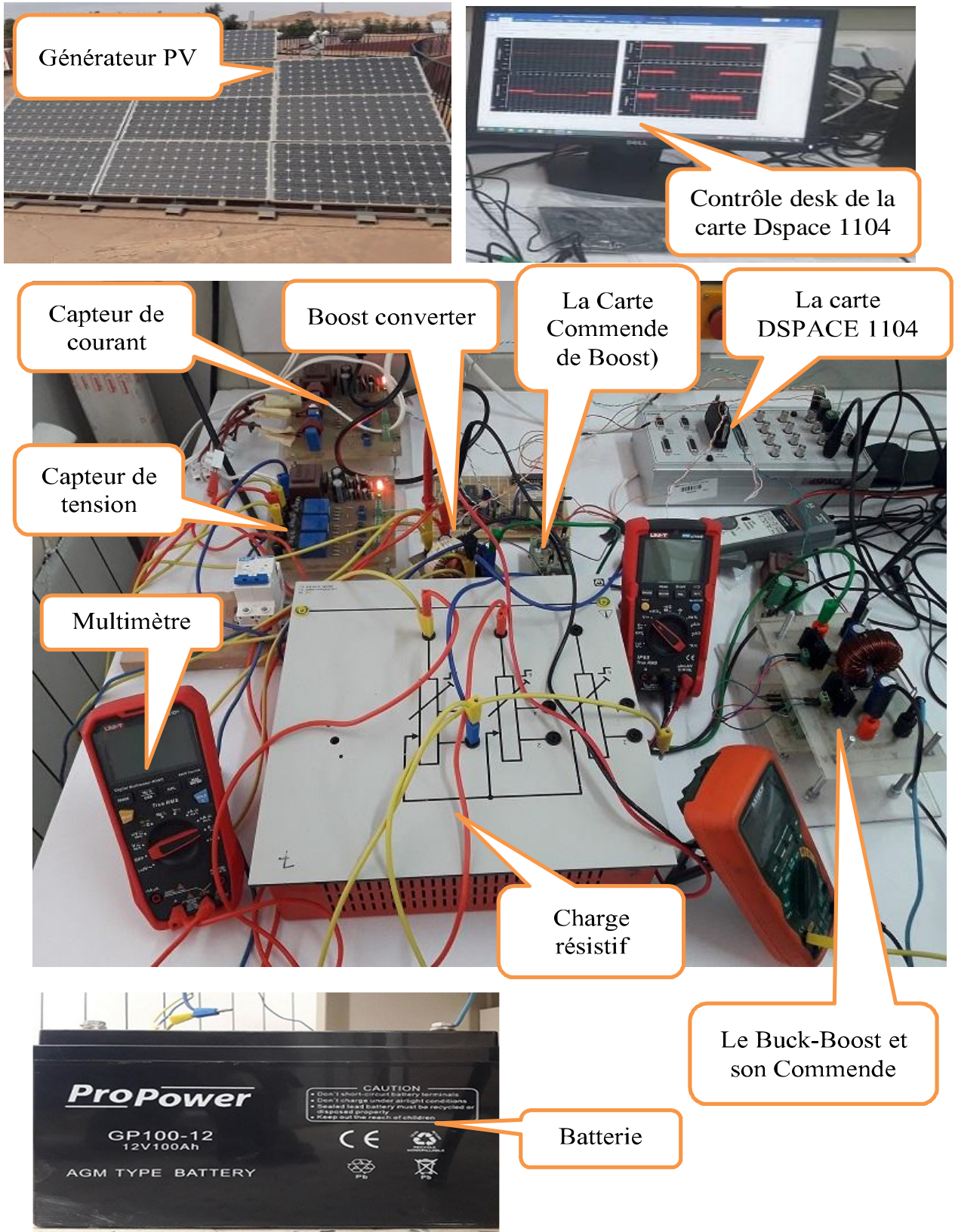


Figure IV.2: Les différents éléments constituant le banc expérimental du système photovoltaïque

IV.3 Les différents éléments de chaîne de conversion photovoltaïque

IV.3.1 Générateur PV:

Notre mini-centrale solaire est composée de 10 modules solaires d'une puissance de 1500 watts, formant ainsi un générateur photovoltaïque. Chaque panneau solaire présente les caractéristiques suivantes (Tableau IV.1, Figure IV.3):

Tableau IV.1: Caractéristiques du module IS-150 C/12.

Puissance optimale	Courant de court-circuit	Tension à circuit ouvert	Courant optimale	Tension optimale
150 W	9.3A	21.6V	8.7A	17.3V



Figure IV.3: Caractéristiques du module (PV) IS-150 C/12.

IV.3.2 dSPACE 1104:

La carte contrôleur DS1104 R&D est une carte standard qui peut être branchée dans un slot PCI d'un PC. Le DS1104 (Figure IV.4 (A)) est spécialement conçu pour le développement de contrôleurs numériques multi variables à grande vitesse et de simulations en temps réel dans champs variés. Il s'agit d'un système de contrôle en temps réel complet basé sur un processeur à virgule flottante 603 Power PC fonctionnant à 250 MHz. À des fins d'E/S avancées, la carte comprend un sous-système DSP esclave basé sur le DSP TMS320F240 microcontrôleur. Aux fins du prototypage rapide de contrôle (RCP) (Figure IV.4(B)), connecteur d'interface spécifique et panneau de connecteurs comme Le CP1104 offre un accès facile à tous les signaux d'entrée et de sortie de la carte. Les appareils externes peuvent être connectés individuellement, déconnecté ou inter changé sans soudure via les connecteurs BNC et les connecteurs Sub-D En

plus du CP1104, le panneau connecteur/LED CLP1104 fournit un ensemble de LED indiquant les états des signaux numériques. Cela simplifie construction, test et dépannage du système.

Ainsi, la carte contrôleur DS1104 R & D est le matériel idéal pour une application de contrôle. [59]

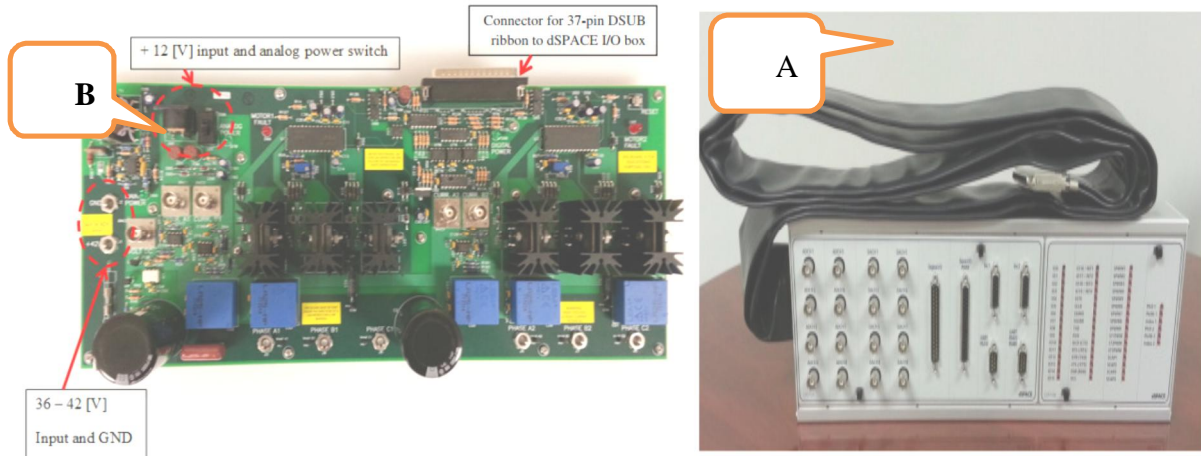


Figure IV.4: différentes parties de la carte Dspace1104 : A) Boîtier CP 1104 avec ruban maître connecté, B) carte de commande DS1104

Le contrôleur de carte DS1104 R&D est formé dans le programme spécial pour le contrôler dans l'ordinateur (Blocs de Master PPC)

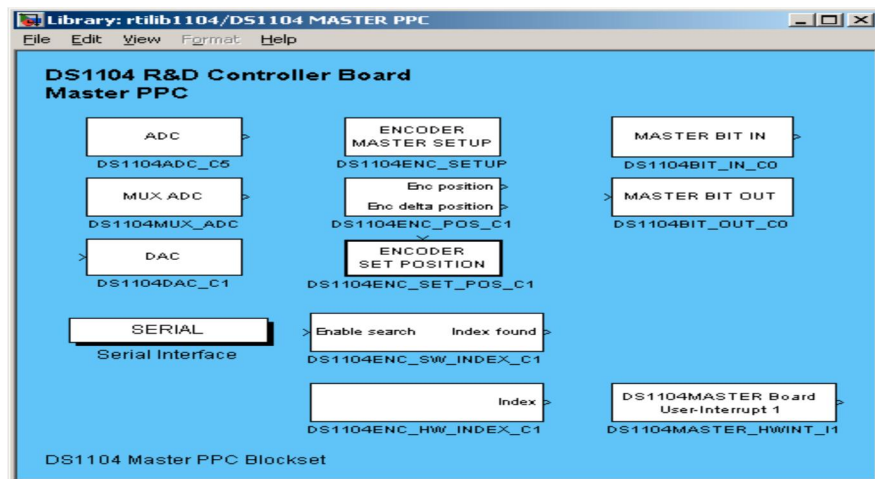


Figure IV.5: Blocs de Master PPC

Le contrôleur de carte DS1104 R&D est formé dans le programme spécial pour le contrôler dans l'ordinateur avec Simulink/Matlab

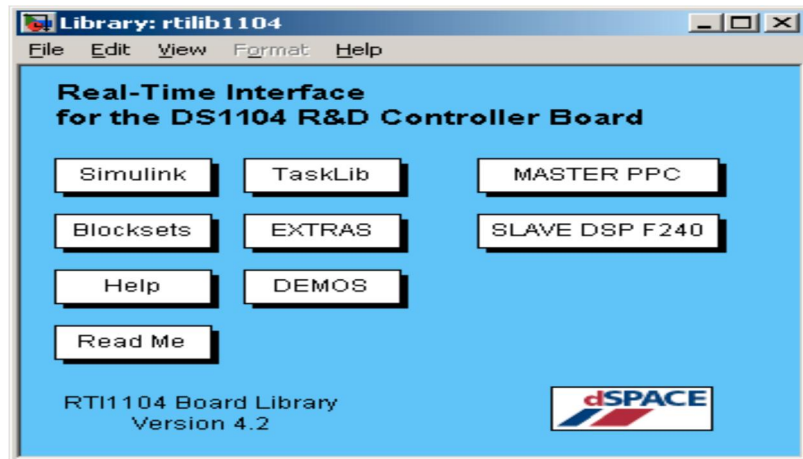


Figure IV.6: Les blocs dSPACE dans Simulink/Matlab

IV.3.3 Les capteurs de tension et de courant :

IV.3.3.1 Capteur de tension LV25 :

Le capteur de tension LV25 est un dispositif utilisé pour mesurer et surveiller la tension électrique dans un système. Il est conçu pour fournir une mesure précise et fiable de la tension. Le LV25 est souvent utilisé dans des applications industrielles, telles que la surveillance des réseaux électriques, les systèmes de contrôle et de gestion de l'énergie, ainsi que dans les équipements électroniques et les systèmes de conversion d'énergie. Ce capteur est caractérisé par ses performances élevées, sa grande précision, sa stabilité à long terme et sa résistance aux interférences électromagnétiques. Il est généralement compact, facile à installer et offre une grande fiabilité dans la mesure des tensions électriques. [60]

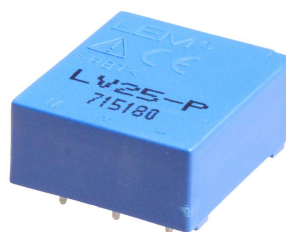


Figure IV.7: Le capteur de tension LV25

IV.3.3.2 Capteur de courant LA55-P :

Le transducteur de courant LA 55-P de LEM est caractérisé par plusieurs fonctionnalités et performances avantageuses. Il offre une sortie instantanée, une grande précision et une excellente linéarité. De plus, il présente une faible dérive en température, un temps de réponse optimisé et une large bande de fréquences. Le LA 55-P ne génère aucune perte d'insertion et

présente une haute immunité aux perturbations externes. Enfin, il est capable de supporter des surcharges de courant. [61]

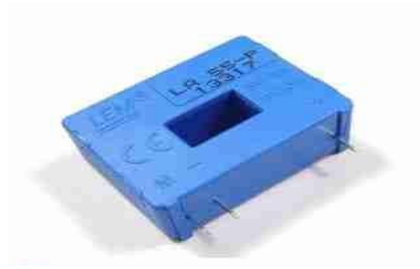
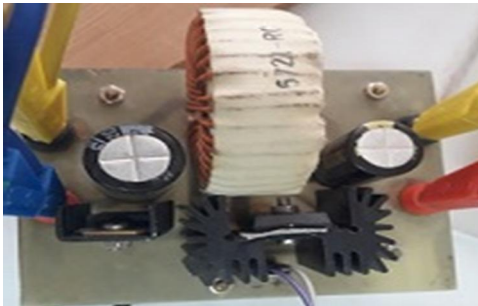


Figure IV.8: Capteur de courant LA55-P

I.3.4 Le Convertisseur DC-DC Elévateur (Boost):

Un convertisseur Boost (également connu sous le nom de convertisseur Step-Up en anglais) est un dispositif d'alimentation à découpage qui permet de convertir une tension continue en une tension continue de valeur supérieure. Il se compose de deux parties essentielles : la carte de puissance et la carte de commande. La figure ci-dessous illustre ces deux composants clés du convertisseur Boost. [62]



La carte de puissance



La carte de commande

Figure IV.9: La carte de Convertisseur Boost et son commande

IV.3.5 Le Convertisseur DC-DC Buck- Boost bidirectionnel

Un convertisseur Buck-Boost est une alimentation à découpage qui permet de convertir une tension continue en une autre tension continue, avec une valeur plus faible ou plus élevée. Ce type de convertisseur est largement utilisé dans de nombreuses applications, telles que les systèmes d'alimentation des véhicules électriques, les systèmes solaires et les alimentations électriques industrielles. La figure ci-dessous illustre ces deux composants clés du convertisseur buck-Boost [63]



La carte de puissance



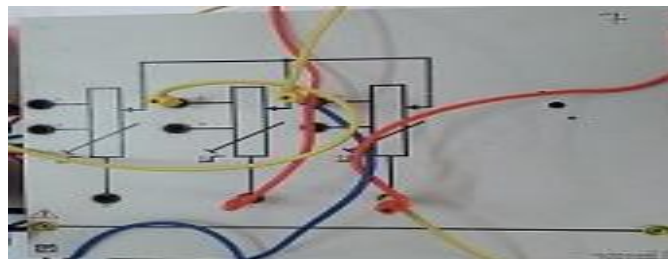
La carte de commande

Figure IV.10: La carte de Convertisseur Buck-Boost et son carte de commande

IV.3.6 La charge résistive

Une charge est tout dispositif, qui absorbe l'énergie dans un système électrique. Les charges résistives, sont celles où l'électricité produit de la chaleur par "effet joule" et non par effet d'un mouvement.

Le banc de charge résistif se base sur le principe d'une charge qui absorbe l'énergie dans un système électrique. Une résistance conforme à la loi d'Ohm (purement résistif). [64]

**Figure IV.11:** La charges résistives

IV.3.7 Le batterie AGM

La série de batteries AGM (GP100-12) 12V100AH, est conçue avec une technologie de pointe, une grille ultra-robuste, des plaques et un électrolyte hautes performances. Les batteries de la série AGM ont une durée de vie en veille longue et fiable et une grande cohérence pour de meilleures performances en utilisation en série. [65]

**Figure IV.12:** batteries AGM (GP100-12)

IV.4 Résultats expérimentaux et discussion

Les deux algorithmes, Perturber et observer (P&O) pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT) et la régulation de la tension du bus continu, ont été mis en œuvre en temps réel. L'étude expérimentale a pris en compte les variations des conditions climatiques ainsi que les variations de l'impédance de charge. Les résultats obtenus sont analysés et discutés dans les sous-sections suivantes.

IV.4.1 Résultats de l'algorithme MPPT sous des conditions climatiques stables.

La Figure IV.13. Présente les variations de puissance, de courant et de tension du générateur photovoltaïque (GPV), ainsi que le courant de la charge, en utilisant l'algorithme Perturber et observer (P&O). Les résultats montrent que notre algorithme de suivi du point de puissance maximale fonctionne de manière optimale, avec une réponse rapide et sans dépassement, démontrant ainsi son efficacité et sa facilité de mise en œuvre. [66]

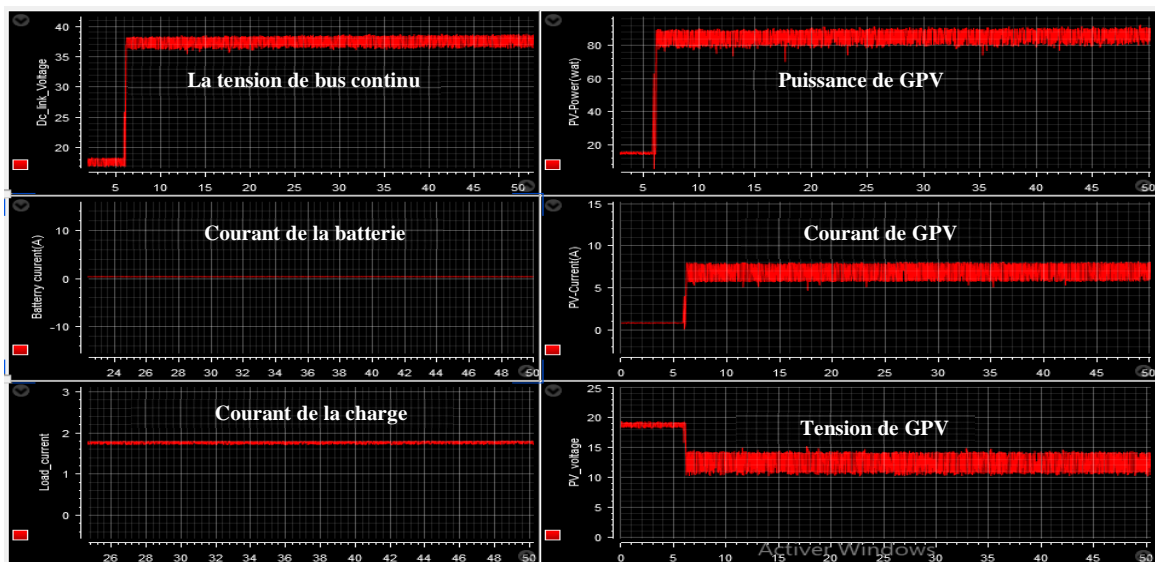


Figure IV.13: Caractéristiques de (puissance, courant, tension) du générateur PV, tension du bus continu, et courant de charge lors de l'implémentation de l'algorithme P&O

IV.4.2 Résultats de l'algorithme MPPT sous des conditions climatiques variables et en l'absence de réglage du bus DC.

- La Figure IV.14 présente les variations de puissance, de courant et de tension du générateur photovoltaïque (GPV), ainsi que le rapport cyclique et le courant de la charge, en utilisant l'algorithme Perturber et observer (P&O), mais avec l'absence de la deuxième boucle de régulation de la tension du bus continu.

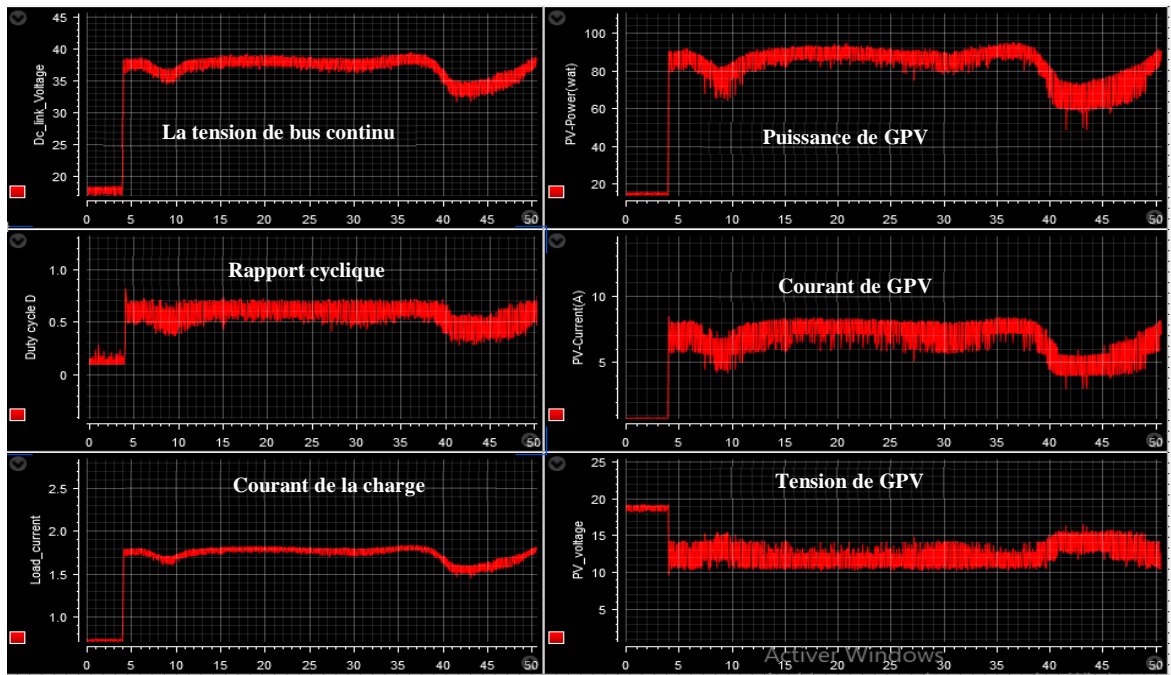


Figure IV.14: Allures de (puissance, courant, tension) du Générateur PV, tension de bus continu, le rapport cyclique et courant de la charge avec variations des conditions climatiques (T, R) et l'absence de régulation de la tension de bus continu.

On peut observer que l'algorithme P&O vise à maximiser la production de puissance. Cependant, en raison des variations des conditions climatiques, toutes les grandeurs sont inévitablement modifiées, telles que la courbe de puissance produite et la tension à la sortie du convertisseur élévateur (boost). Par conséquent, la charge est soumise à une alimentation instable, soulignant ainsi la nécessité de réguler la tension du bus continu. Cette régulation sera mise en œuvre dans le scénario suivant. [66]

IV.4.3 Résultats de l'algorithme MPPT sous des variations des conditions climatiques et avec la présence de réglage du bus DC

- La Figure IV.15 présente les variations de puissance, de courant, de tension du générateur photovoltaïque, de courant de batterie et de courant de charge lors de l'utilisation de l'algorithme Perturber et observer (P&O) en présence d'une boucle de régulation de la tension du bus continu. L'expérience a été réalisée en tenant compte des changements des conditions climatiques.

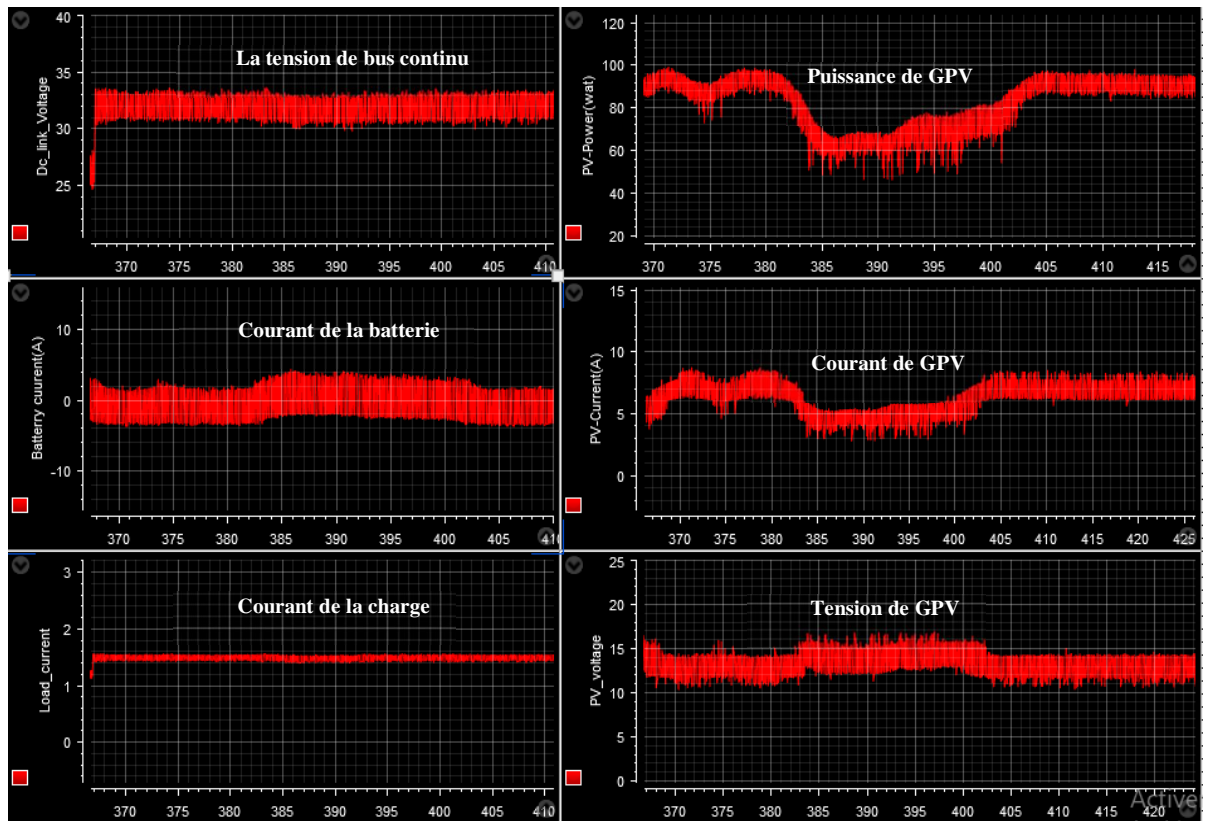


Figure IV.15: Caractéristiques de (puissance, courant, tension) du générateur PV, tension du bus continu, courant de la batterie et courant de charge avec variations des conditions climatiques (T, R) et la présence de régulation de la tension du bus continu.

On peut remarquer que malgré les fluctuations de l'éclairement, la tension du bus continu est maintenue à une valeur constante, assurant ainsi une alimentation stable de la charge (courant de charge constant). Cette régulation efficace est rendue possible grâce à la présence de la batterie dans les systèmes à base d'énergies renouvelables, permettant de compenser les variations de puissance causées par la diminution de l'éclairement. [67]

IV.4.4 MPPT sous des variations de l'impédance de charge

- La Figure IV.16 présente les variations de puissance, de courant, de tension du GPV, de courant de batterie et de courant de charge lors de l'utilisation de l'algorithme P&O en présence d'une boucle de régulation de tension de bus continu. L'expérience a été réalisée en modifiant l'impédance de la charge. Comme on peut le remarquer, malgré les variations du courant de charge, c'est-à-dire de l'impédance, la tension de bus continu reste constante, ce qui démontre l'efficacité des contrôleurs choisis.

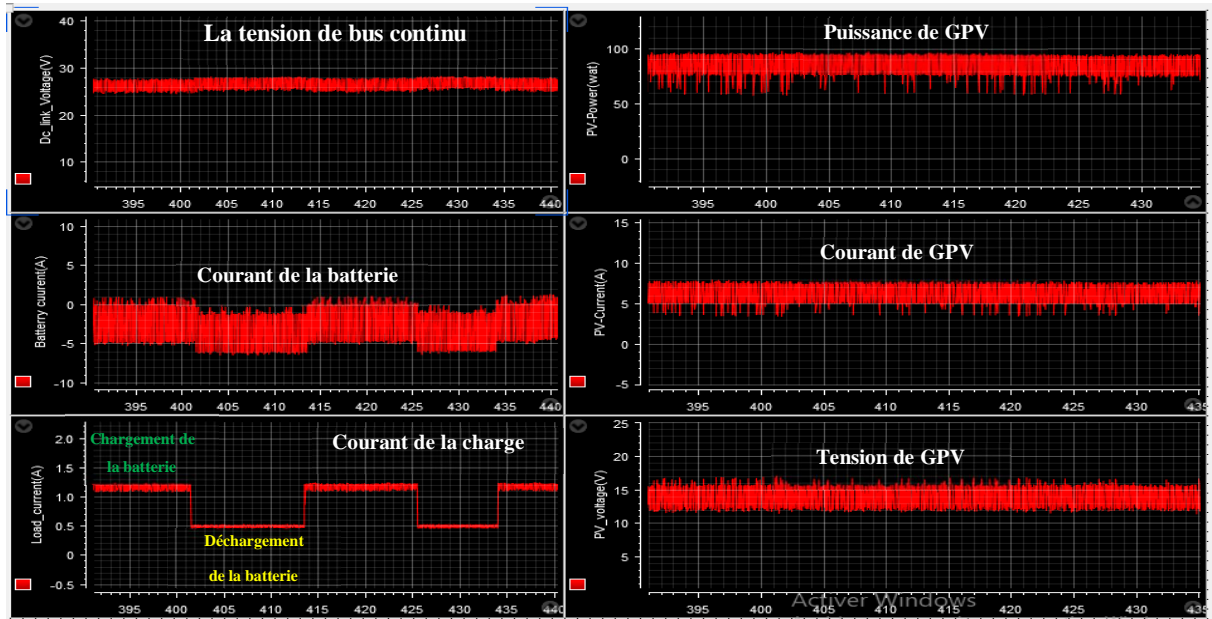


Figure IV.16: Caractéristiques de (puissance, courant, tension) du générateur PV, tension du bus continu, courant de la batterie et courant de charge avec variations de l'impédance de la charge et la présence de régulation de la tension du bus continu.

IV.4.5 Gestion de puissance de système PV avec des batteries d'accumulation

Afin de gérer la production d'énergie entre la source d'alimentation et la batterie, un convertisseur bidirectionnel est utilisé pour optimiser l'utilisation de l'énergie et maintenir la batterie dans des conditions de charge idéales. Cette approche vise à réduire les pertes d'énergie et améliorer l'efficacité globale du système. Grâce à cette technologie, la gestion de la batterie peut être réalisée de manière plus efficace, ce qui permet de prolonger sa durée de vie.[68]

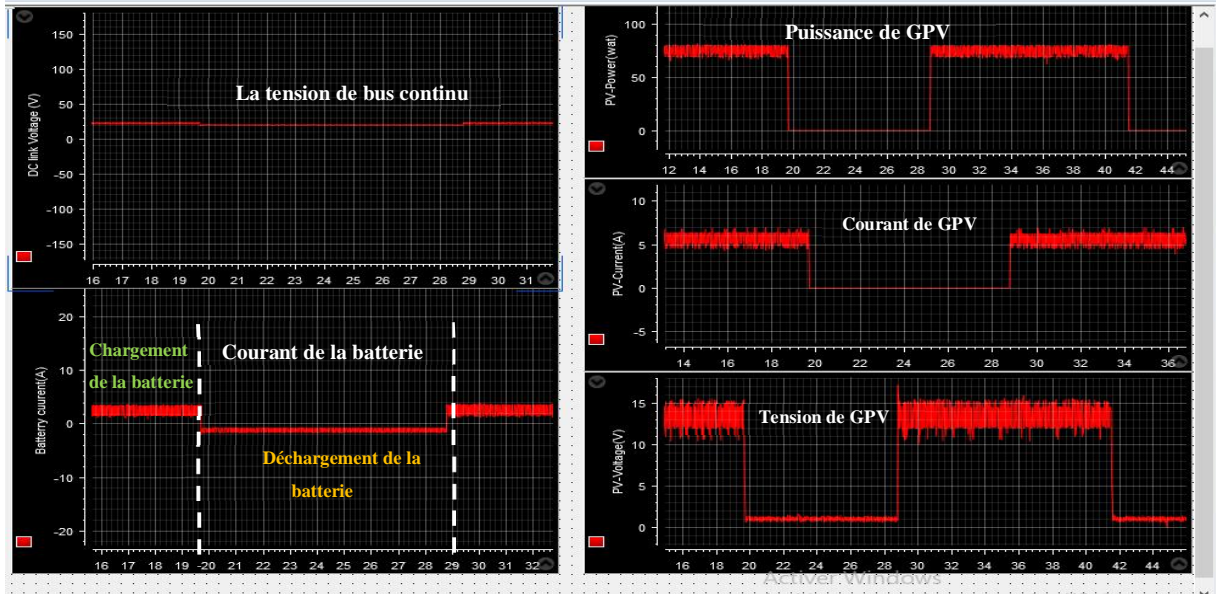


Figure IV.17: Caractéristiques de (puissance, courant, tension) du générateur PV, tension du bus continu, courant de la batterie avec la présence de la boucle de gestion de puissance.

- Au cours de la période de temps de (19,6 à 29) secondes, nous avons observé l'arrêt du générateur photovoltaïque, ce qui s'est reflété dans les courbes de puissance, de courant et de tension du GPV. Simultanément, nous avons remarqué un changement dans la courbe de courant de la batterie, passant de la phase de charge à la phase de décharge pour répondre à la demande de charge. Cette phase de décharge s'est poursuivie jusqu'à environ 29 secondes, moment où l'alimentation a été rétablie à partir du générateur photovoltaïque. Par conséquent, la batterie est revenue à l'état de charge pendant la période de (29 à 41) secondes.

En résumé, pendant la phase d'indisponibilité du générateur photovoltaïque, la batterie est sollicitée pour compenser le manque d'alimentation, ce qui se traduit par une augmentation du courant de la batterie. La tension du bus continu peut diminuer, tandis que la tension de la batterie peut varier en fonction de l'état de charge et de la demande du système. Cette relation entre l'alimentation de la batterie et l'indisponibilité du GPV est essentielle pour assurer la continuité de l'alimentation et maintenir la stabilité du système.

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons réalisé une étude expérimentale sur un système de production d'énergie solaire. Nous avons examiné les composants utilisés et analysé les résultats obtenus. Pour faire face à l'aspect imprévisible des sources d'énergie renouvelables, nous avons conçu et mis en place un système d'énergie solaire connecté à la carte contrôleur dSPACE 1104. Des cartes de commande et un transducteur ont été développés pour gérer les contraintes de courant et de tension des deux côtés, et un logiciel approprié a été utilisé pour les configurer. Nous avons effectué un test empirique afin d'évaluer les performances des différentes boucles de contrôle. Un convertisseur Buck-Boost a été utilisé pour réguler la tension du bus DC et permettre la charge/décharge de la batterie avec une double commande. Les résultats expérimentaux obtenus montrent que le système fonctionne de manière efficace pour assurer un transfert d'énergie fiable et répondre à nos besoins en cas de panne de courant du générateur photovoltaïque.

Conclusion générale

Conclusion générale:

Au cours des dernières décennies, l'utilisation massive de combustibles fossiles a entraîné de nombreux problèmes environnementaux critiques, tels que la pollution atmosphérique et le réchauffement de la planète. De plus, la demande mondiale croissante en énergie a conduit à une intensification des émissions de gaz à effet de serre, selon l'Administration américaine d'information sur l'énergie (EIA) et l'International Energy Outlook.

Ces défis ont incité le monde à rechercher et à développer des alternatives nouvelles et renouvelables pour une production d'énergie efficace et fiable, ainsi que des méthodes de stockage de l'énergie produite. Dans ce contexte, cette mémoire propose de nouveaux concepts pour un système photovoltaïque et des méthodes de stockage d'énergie.

Ce travail de recherche est présenté en quatre chapitres. Le premier chapitre présente l'état de l'art et les travaux connexes sur les méthodes de stockage d'énergie et donne un aperçu du fonctionnement du système photovoltaïque. Le deuxième chapitre aborde l'amélioration de la modélisation du convertisseur Boost, la modélisation photovoltaïque et l'utilisation d'un algorithme (P&O) de suivi du point de puissance maximale (MPPT). Le troisième chapitre se concentre sur l'amélioration de la modélisation du convertisseur Buck-Boost, la modélisation de la batterie et la gestion de l'énergie produite dans le système photovoltaïque. Enfin, le quatrième chapitre présente les travaux expérimentaux réalisés sur un système photovoltaïque, ainsi que la simulation des résultats obtenus à l'aide de la carte dSPACE 1104.

Dans l'ensemble, les travaux expérimentaux et théoriques réalisés ont démontré l'importance du stockage d'énergie pour répondre aux besoins en temps voulu. Ils ont également mis en évidence les avantages et la gestion de l'énergie dans le fonctionnement du système photovoltaïque. De plus, ce travail s'est concentré sur l'implémentation d'un système de contrôle efficace et robuste pour la gestion de la puissance extraite et délivrée par le système photovoltaïque.

Les résultats obtenus dans cette mémoire ouvrent la voie à de futures recherches et développements dans le domaine de l'énergie photovoltaïque et du stockage d'énergie. Ces avancées sont essentielles pour promouvoir une transition vers des sources d'énergie propres et durables, contribuant ainsi à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et à la préservation de l'environnement.

Références:

- [1] <http://energie-eolienne.over-blog.com/2016/04/les-energies-renouvelables.html>
- [2] <https://www.connaissancedesenergies.org/levolution-du-mix-electrique-mondial-en-2022-en-2-infographies->
- [3] Arthouros Zervos et Rana Adib « RENEWABES 2022. GLOBAL STATUS REPORT ».2022
- [4] <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie>
- [5] Belhadj Mohammed, « Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome ». université de Bechar, mémoire de magister.
- [6] Taraft Saci, « Etude de Stockage inertiel d'énergie dans une chaîne de conversion éolien à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation ». Université A/MIRA de Bejaïa, Mémoire de Magister 2008
- [7] <https://www.smartgrids-cre.fr/encyclopedie/le-stockage-delelectricite/les-differentes-technologies-stationnaires-de-stockage-de-lelectricite>
- [8] <https://laconsciencedesetudiants.fr/2020/06/01/le-stockage-de-lelectricite/>
- [9] <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/climat-environnement-et-economie-circulaire/stockage-denergie-accompagner-deploiement-des-energies-renouvelables>
- [10] J-C. Sabonnadière, "Nouvelles technologies de l'énergie 1- Les énergies renouvelables", Hermès - Lavoisier, 2006.
- [11] ZIAT Soheir Ibtissem. « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque commandé par la commande MPPT (P&O) ». Centre Universitaire Belhadj Bouchaïb d'Ain-Temouchent. Mémoire de Master 2012.
- [12] <https://www.choisir.com/energie/articles/117006/les-cellules-photovoltaïques-source-inepuisable-dinnovations>
- [13] Falk Antony, Christian Durschner, Karl-Heinz Remmers : « Le photovoltaïque pour tous, conception et réalisation d'installations », deuxième édition, Berlin 2010
- [14] Liman Amine et Soukane Samir « Etude et modélisation d'un système photovoltaïque autonome », mémoire d'Ingénieur, UMMTO, 2012
- [15] Anne Labouret, Michel Villon: « Energie solaire photovoltaïque », Dunod 3ème édition 2006.
- [16] S. Makhloufi, « Contribution à l'optimisation des installations photovoltaïques par des commandes intelligentes ». Thèse de doctorat en science université de Batna, 2013.
- [17] D. Y. Goswami, « Principles of Solar Engineering ». Taylor and Francis, second ed, 2000.
- [18] R. Geoffrey, J. Walker, C. Pierce, "Photovoltaic DC-DC Module Integrated Converter for Novel Cascaded and Bypass Grid Connection Topologies, Design and Optimisation", IEEE, 2007

- [19] Gabriel -Ocatvian CIMUCA « Système inertiel de stockage d'énergies Associe A des générateur éoliens ». Ecole nationale supérieur d'arts et métiers center de Lille, Thés de doctorat soutenue en 2005
- [20] K. Ishaque, Z. Salam, H. Taheri (2011) Accurate MATLAB Simulink PV System Simulator based on a two-Diode Model, Journal of Power Electronics, Vol.11, No.2, pp.179-187.
- [21] P. Sahebrao N, R. C. Prasad (2014) Design and simulation of MPPT algorithm for solar energy system using Simulink model, International Journal of Research in Engineering and Applied Sciences (IJREAS), ISSN : 2249-9210, Vol.02, Issue.01, pp.37-40.
- [22] <https://energieplus-lesite.be/theories/photovoltaique6/caracteristiques-electriques-des-cellules-et-des-modules-photovoltaiques/>
- [23] S. Sholapur, K. R. Mohan, T. R. Narsimhegowda (2014) Boost Converter Topology for PV system with Perturb and Observ MPPT Algorithm, IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering, (IOSR-JEEE), e-ISSN: 2278-1676, p-ISSN: 2320-3331, Vol.9, Issue.4, Doi : 10.9790/1676-09425056, pp.50-56.
- [24] Hocine AZAZLA. « Commande d'un système hybride contenant un panneau solaire et une batterie ». Université Mohamed Khider – Biskra. Mémoire de Master.
- [25] Hallali Kamelia : « Modélisation d'une cellule photovoltaïque, étude comparative », Mémoire de Magister, UMMTO, 2012
- [26] S. ABOUDA, « Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques:application aux systèmes de pompage » Thèse de doctorat,co-tutelle de l'Université de Reims Champagne-Ardenne et de l'Université de Sfax, Avril 2015.
- [27] Aould Mohamed Yahya, ET I. Youm « étude et modélisation d'un générateur photovoltaïque » revue des énergies renouvelables vol. 11 n°3 Sénégal, 2008
- [28] HAJAR DOUBABI (2021) « Contribution à l'amélioration de l'efficacité d'une chaine de conversion photovoltaïque ». L'université de Reims Champagne-Ardenne - Mémoire de DOCTEURA
- [29] OBEIDI THAMEUR. « Application des algorithmes génétique dans la commande des hacheurs MPPT ». Université. Ecole National Polytechnique - Mémoire de Magister .2006
- [30] RUGAMBA Jean Vainqueur et MANIRUMVA Eloge. « Etude et optimisation d'un système PV en utilisant des MPPT à base des algorithmes intelligents ». Université Ibn Khaldoun de Tiaret - Mémoire de Master2016
- [31] A. A. Fardoun and E. H. Ismail, "Ultra step-up DC-DC converter with reduced switch stress," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 46, no. 6, pp. 2025–2034, Sep./Oct. 2010
- [32] BOUZERIA HAMZA. « MODELISATION ET COMMANDE D'UNE CHAINE DE CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE », Université Hadj Lakhdar Batna- DOCTORAT 3 ème cycle LMD en Électrotechnique - 2016

- [33] TOUIL Nacer Eddine, GHENBAZI Slimane, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque », mémoire de fin d'études de master , Réseaux électriques, septembre 2015
- [34] M.belhad 'Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome', Mémoire de magister université de bachar ,2008.
- [35] S.ABADA ' Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur sepic', Mémoire Maître es Sciences, Université laval, 2011.
- [36] M. G. Villalva and J. R. Gazoli, and E. R. Filho 'Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays', *Jornal of power electronics*, May 2009.
- [37] A. labouret et M. viloz préface de jean louis bal 'Energie solaire Photovoltaïque', livrer 4 éditions, 2008.
- [38] TOUMI Ilham. « Contribution à l'amélioration de performance d'une chaine énergétique hybride (éolienne/ photovoltaïque) basée sur des techniques d'intelligence artificielle ». Mémoire DOCTORAT. Université Kasdi Merbah Ouargla 2023
- [39] O.BENSEDDIK, F.DJALLOUD 'étude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque', université de KASDI MERBAH- OUARGLA, 2012.
- [40] N. Kahoul, M. Mekki (2015) Adaptive P&O MPPT Technique for Photovoltaic Buck-Boost Converter System, *International Journal of Computer Applications*, ISSN: 0975-8887, Vol.112, No.12, Doi : 10.5120/19719-0773, pp. 23-27.
- [41] S.ZIAT Et N.MEDJAHED. « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque commandé par la commande MPPT (P&O) ». Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent. - Mémoire de fin d'études de Master -2020
- [42] Zaatri et S. Belhour, « Reconstitution de la caractéristique I – V et détermination de la puissance d'un système photovoltaïque », *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 12 N°4 (2009) 563 – 574, (reçu le 31 Août 2009 – accepté le 25 Décembre 2009).
- [43] B Benlahbib, F Bouchafaa, N Bouarroudj, S Mekhilef - *International Journal of Power Electronics*, 2019 "Fractional order PID controller for DC link voltage regulation in hybrid system including wind turbine-and battery packs-experimental validation"
- [44] A. Thameur et al., "New Fuzzy Control of Photovoltaic Conversion Cascade Based Three Levels Inverter for Stand-Along Applications," in 2018 Twentieth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), IEEE, Dec. 2018, pp. 1009–1013. doi: 10.1109/MEPCON.2018.8635162.
- [45] BOUDEN ABDELMALEK « Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque » Thème de Magister, Université Mentouri _ Constantine 2008.
- [46] Noureddine Bouarroudj, Djamel Boukhetala, Abdelhamid Djari, Younes Rais, Boualem Benlahbib "FLC based Gaussian membership functions tuned by PSO and GA for MPPT of photovoltaic system: A comparative study"
- [47] M.Chikh, « Étude analytique conceptuelle des systèmes PV de puissance adopté aux Site isolés de L'Algérie », thèse de magister, CDER, 1994.

- [48] Chaurey, C and S Deambi.1992, « Battery storage Power systems:an verview ».Renewable Energy 2 (3):227-235.
- [49] Bendjellouli Zakaria « Contribution à la modelisation d'une cellule solaire « Memoire de Magister2008/2009, Universite de Bechar
- [50] M.belhad « Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome », Mémoire de magister université de bachar ,2008.
- [51] S. PETIBON « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », université de Toulouse, 2009.
- [52] A. Ould Mahmoud « Caractérisation, modélisati~n, fonctionnement et impact d'un système hybride pour l'alimentation de charge mixe » These de doctorat Université Cheikh Anta Diop de Dakar2008
- [53] BENLAHBIB Boualam . « Supervision d'un système hybride éolien-Photovoltaïque connecté au réseau électrique » DOCTORAT en SCIENCE En Electronique .USTHB 2019
- [54] Fazia, B., "modélisation et simulation des performances d'une installation hybride de conversion d'énergies renouvelables" mémoire de magister, université mouloud Mammeri de tizi-ouzou. 26/09/2011.
- [55] Othman, B. and D. Fathi, « Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque », mémoire de magister, université de KASDI MERBAH de OURGLA. 2011/2012
- [56] S. Chikha, « Optimisation de la puissance dans les systèmes photovoltaïques », Mémoire de Magistère, université de OEB, 2011/2012.
- [57] Bendjamâa Ibrahim., « Modélisation et commande d'un système de stockage Photovoltaïque » / Magister Université Abou-Bakr Belkaid–Tlemcen.
- [58] Amar Guichi “Control Optimization of PV Conditioner under Partial Shading in Hybrid System ” Université de M'Sila et University of Malaya, Kuala Lumpur Malaysia. Publication en tant qu'article complet dans Energy Conversion and Management journal
- [59] Amardeep B. Shitole. « dSPACE (DS-1104) Implementation of Detection and Control Algorithm of Dynamic Voltage Restorer (DVR) ». dSPACE User Conference 2012 – India Sept 14th' 2012]
- [60] dSPACE Catalog 2009, « DS1104 R & D controller board hardware installation and configuration for DS1104. » Paderborn, Germany.
- [61] <https://www.moussasoft.com/product/lem-55-p-capteur-de-courant>
- [62] https://fr.wikipedia.org/wiki/Convertisseur_Boost
- [63] <http://tslipg.com/en/?product=battery-agm>
- [64] <https://banc-de-charge.com/principe/banc-de-charge-resistif-inductif/>
- [65] <https://www.batterie-solaire.com/batterie-agm.htm>

- [66] B Benlahbib, N Bouarroudj, S Mekhilef, D Abdeldjalil... - International Journal of Hydrogen Energy, 2020 “Experimental investigation of power management and control of a PV/wind/fuel cell/battery hybrid energy system microgrid”
- [67] B Benlahbib, N Bouarroudj, S Mekhilef, T Abdelkrim... - Elektronika ir Elektrotechnika, 2018 “A fuzzy logic controller based on maximum power point tracking algorithm for partially shaded PV array-experimental validation”
- [68] Nouredine Bouarroudj, Djamel Boukhetala, Vicente Feliu-Batlle, Fares Boudjema, Boualam Benlahbib, Bachir Batoun “Maximum power point tracker based on fuzzy adaptive radial basis function neural network for PV-system”