

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Amar Telidji - Laghouat



Faculté de Technologie
Département d'électronique

THÈSE DE DOCTORAT EN SCIENCES

Spécialité : Génie électrique

Présentée et soutenue le 12/07/2022 par :

ROUGAB Ilyes

THEME

Etude et Modélisation d'un Système Hybride Photovoltaïque - Hydrogène en Site Isolé

Membres de jury :

BELKHEIRI Mohammed	Président de jury	Professeur	Université de Laghouat
CHEKNANE Ali	Directeur de thèse	Professeur	Université de Laghouat
HELMAOUI Abderrachid	Examineur	Professeur	Université de Béchar
TOUAFEK Khaled	Examineur	Directeur de recherche	URAER de Ghardaïa
AMEUR Aissa	Examineur	Professeur	Université de Laghouat

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à remercier en premier lieu "ALLAH" miséricordieux, qui m'a donné la force pour mener à bien ce travail.

*Je tiens à exprimer mes vifs remerciements et reconnaissances à mon promoteur **Mr. Ali Cheknane**, professeur à l'université Amar Telidji de Laghouat pour la patience et les qualités scientifiques et humaines, dont il a fait preuve, je le remercie vivement pour son soutien scientifique et sa disponibilité.*

Un remerciement particulier à tous les membres du jury : Mr. Belkheiri Mohammed, Mr. Ameer Aissa, Mr. Helmaoui Abderrachid et Mr. Touafek Khaled pour avoir accepté de juger et d'évaluer cette thèse.

Aussi, j'adresse mes chaleureux remerciements à mes parents, mes frères et mes sœurs.

Ilyes

Dédicace

Je dédie ce modeste travail, à mes chers parents,

À tous mes frères et sœurs,

À tous mes amis,

Et à tous ceux qui de près ou de loin ont participé

à cet aboutissement

المخلص

الهدف من هذا العمل هو تقييم أداء نظام هجين مستقل لإنتاج الطاقة الكهربائية، يقرن النظام المجال الكهروضوئي بمحلل كهربائي وخلية وقود، ويتم إدارته بواسطة طريقة إدارة الطاقة من أجل ضمان كهربة منزل يقع في مكان معزول. في هذا النظام، يتم توفير الحمل بواسطة المولد الكهروضوئي عبر محول DC/DC تحكمه عنصر تحكم MPPT أو بواسطة خلية الوقود. المولد الكهروضوئي هو المصدر الرئيسي لإنتاج الكهرباء، إذا تجاوزت طاقته الطاقة المطلوبة بواسطة الحمل، سيكون هناك فائض من الطاقة التي يمكن أن تزود المحلل الكهربائي. هذا الأخير ينتج الهيدروجين الذي يتم تخزينه في خزان. عندما يتعذر على المولد الكهروضوئي تلبية متطلبات الحمل، تستخدم خلية الوقود الهيدروجين المخزن لتوليد الكهرباء اللازمة لتشغيل الحمل. يتم تنفيذ نمذجة ومحاكاة سلوك النظام الهجين الكهروضوئي/الهيدروجين المقترح في بيئة Simulink//MATLAB. تظهر النتائج التي تم الحصول عليها كفاءة إدارة الطاقة للنظام وإدارة طلب الحمل بنجاح. يمكن استخدام نمذجة هذا النظام في تحسين التشغيل والتحكم في تدفق الطاقة لنظام هجين حقيقي.

الكلمات المفتاحية: النظام الكهروضوئي، النظام الهجين، خلية الوقود، المحلل الكهربائي، إنتاج الهيدروجين، التحكم MPPT، إدارة الطاقة.

Résumé

L'objectif de ce travail est d'évaluer les performances d'un système hybride autonome de production d'énergie électrique, le système couple un champ photovoltaïque à un électrolyseur et une pile à combustible, il est géré par une méthode de gestion d'énergie afin d'assurer l'électrification d'une maison située dans un site isolé. Dans ce système, la charge est alimentée par le GPV via un convertisseur DC/DC régi par une commande MPPT ou par la pile à combustible. Le GPV est la source principale de production de l'électricité, si sa puissance dépasse la puissance demandée par la charge, il y aura un excès de puissance qui permet d'alimenter l'électrolyseur. Ce dernier produit l'hydrogène qui sera stocké dans un réservoir. Lorsque le GPV est incapable de répondre aux demandes de la charge, la pile à combustible utilise l'hydrogène stocké pour produire l'électricité nécessaire pour faire fonctionner la charge. La modélisation et la simulation du comportement du système hybride PV/Hydrogène proposé est réalisée sous l'environnement Simulink/MATLAB. Les résultats obtenus montrent bien l'efficacité de la gestion énergétique du système et la demande de charge est gérée avec succès. La modélisation de ce système peut être utilisée pour dimensionner, optimiser le fonctionnement et contrôler le flux énergétique d'un système hybride réel.

Mots-clés : Système photovoltaïque, système hybride, Pile à combustible, électrolyseur, production d'hydrogène, commande MPPT, gestion d'énergie.

Abstract

The objective of this work is to evaluate the performances of an autonomous hybrid system of production of electrical energy, the system couples a photovoltaic field to an electrolyzer and a fuel cell, it is managed by a method of management of energy in order to ensure the electrification of a house located in an isolated site. In this system, the load is supplied by the GPV via a DC/DC converter governed by an MPPT control or by the fuel cell. The GPV is the main source of electricity production, if its power exceeds the power required by the load, there will be an excess of power which can supply the electrolyzer. The latter produces hydrogen which will be stored in a tank. When the GPV is unable to meet the demands of the load, the fuel cell uses the stored hydrogen to generate the electricity needed to run the load. The modeling and simulation of the behavior of the proposed hybrid PV/Hydrogen system is carried out under the Simulink/MATLAB environment. The results obtained show the efficiency of the energy management of the system and the load demand is successfully managed. The modeling of this system can be used to size, optimize the operation and control the energy flow of a real hybrid system.

Keywords: Photovoltaic system, hybrid system, fuel cell, electrolyzer, hydrogen production, MPPT control, energy management.

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Répartition de la production d'électricité mondiale en 2019

Figure I.2 : Répartition de la production d'électricité mondiale d'origine renouvelable en 2019

Figure I.3 : Croissance de production d'électricité en Algérie

Figure I.4 : Progression des énergies renouvelables dans la production nationale

Figure I.5 : L'effet photovoltaïque

Figure I.6 : Modèles électriques de la cellule photovoltaïque

Figure I.7 : Caractéristiques électriques d'un panneau PV

Figure I.8 : Influence de l'éclairement sur les caractéristiques électriques d'un panneau PV : (a) Courant-tension ; (b) Puissance-tension

Figure I.9 : Influence de la température sur les caractéristiques électriques d'un panneau PV : (a) Courant-tension ; (b) Puissance-tension

Figure I.10 : Technologies des cellules PV : (a) Monocristalline; (b) Polycristalline; (c) amorphe

Figure I.11 : Cellule, module, panneau et champ PV

Figure I.12 : Association des cellules PV identiques en série et sa caractéristique

Figure I.13 : Association des cellules PV identiques en parallèle et leur caractéristique

Figure I.14 : Protection du panneau PV par diodes 'bypass' et 'anti-retour'

Figure I.15 : Schéma descriptif d'un système autonome

Figure I.16 : Schéma descriptif d'un système hybride

Figure I.17 : Schéma descriptif d'un système connecté au réseau

Chapitre II

Figure II.1 : Schéma fonctionnel du système PV complet

Figure II.2 : Convertisseur DC/DC de type Buck

Figure II.3 : Convertisseur DC/DC de type Boost

Figure II.4 : Convertisseur DC/DC de type Buck-Boost

Figure II.5 : Principe de la commande P&O

Figure II.6 : Organigramme de la commande P&O

Figure II.7 : Principe de la méthode P&O indirecte

Figure II.8 : Schéma fonctionnel de la commande floue

Figure II.9 : Fonctions d'appartenance floue utilisées dans le processus de fuzzification

Chapitre III

Figure III.1 : Modèle du système PV sous Simulink

Figure III.2 : Modèle du générateur PV sous Simulink

Figure III.3 : Modèle du convertisseur DC/DC sous Simulink

Figure III.4 : Choix de la commandes MPPT

Figure III.5 : Courbes de tension pour différentes commandes MPPT sous éclairement (1000W/m^2) et température ($25\text{ }^\circ\text{C}$)

Figure III.6 : Courbes de courant pour différentes commandes MPPT sous éclairement (1000W/m^2) et température ($25\text{ }^\circ\text{C}$)

Figure III.7 : Courbes de puissance pour différentes commandes MPPT sous éclairement (1000W/m^2) et température ($25\text{ }^\circ\text{C}$)

Figure III.8 : Profil de l'éclairement solaire

Figure III.9 : Courbes de puissance pour différentes commandes MPPT sous un éclairement variable

Chapitre VI

Figure IV.1 : Cellule d'électrolyseur de type PEM

Figure IV.2.a : Variation des surtensions en fonction de la densité de courant

Figure IV.2.b : Caractéristique tension-densité de courant d'un électrolyseur

Figure IV.3 : Effet de la température sur la caractéristique électrique d'un électrolyseur

Figure IV.4 : Pile à combustible de type PEM

Figure IV.5.a : Variation des pertes en fonction de la densité de courant

Figure IV.5.b : Caractéristique Tension-Densité de courant d'une cellule de pile à combustible

Figure IV.6 : Caractéristique Puissance-Densité de courant d'une cellule de pile à combustible

Figure IV.7.a : Effet de la température sur la caractéristique Tension-Densité de courant

Figure IV.7.b : Effet de la température sur la caractéristique Puissance-Densité de courant

Figure IV.8.a : Effet de la pression sur la caractéristique Tension-Densité de courant d'une PAC

Figure IV.8.b : Effet de la pression sur la caractéristique Puissance-Densité de courant d'une PAC

Chapitre V

Figure V.1 : Principaux composants du système PV/hydrogène

Figure V.2 : La région étudiée (Kheng, Laghouat)

Figure V.3 : Profil de la charge le 31/12/2021 et le 14/06/2021

Figure V.4 : Profil de l'éclairement global et de la température le 31/12/2021

Figure V.5 : Puissance générée par le GPV

Figure V.6 : Puissance de l'électrolyseur

Figure V.7 : Puissance de la pile à combustible

Figure V.8 : Puissance de tous les composants du système hybride

Figure V.9 : Profil de l'éclairement global et de la température le 14/06/2021

Figure V.10 : Puissance générée par le GPV

Figure V.11 : Puissance de l'électrolyseur

Figure V.12 : Puissance de la pile à combustible

Figure V.13 : Puissance de tous les composants du système hybride

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1: Taux d'ensoleillement par région en Algérie

Chapitre II

Tableau II.1: Base de règles de logique floue

Chapitre III

Tableau III.1: Caractéristiques du panneau PV 'MSX60'

Tableau III.2: Comparaison entre les techniques MPPT

Chapitre VI

Tableau IV.1: Différents types de technologies d'électrolyseur

Tableau IV.2: Données techniques des électrolyseurs

Tableau IV.3: Différents types des Piles et leurs caractéristiques techniques

Chapitre V

Tableau V.1: Besoins énergétiques d'un habitat individuel

Tableau V.2: Calcule de nombre de panneaux PV nécessaire

Nomenclature

PV	Photovoltaïque
GPV	Générateur photovoltaïque
MPPT	Maximum Power Point Tracking
P&O	Perturbation et Observation
PAC	Pile à combustible
R_s	Résistance Série
R_p	Résistance parallèle
I_{cc}	Courant de court-circuit
V_{co}	Tension de circuit ouvert
STC	Standard Test Conditions
T	Température
E	Eclairement solaire
P_c	Puissance crête
FF	Facteur de forme
DC/DC	Continu/Continu
α	Rapport cyclique
M	Rapport de conversion
PID	Proportionnel Intégral Dérivé
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
PWM	Pulse Width Modulation
PEM	Proton Exchange Membrane
SOE	Solid Oxide Electrolyser
AFC	Alkaline Fuel Cell
SOFC	Solid Oxide Fuell Cell

PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell
V_{ele}	Tension de l'électrolyseur
E_{rev}	Tension réversible
E_0	Tension standard (tension à vide)
V_{act}	Tension d'activation
V_{ohm}	Tension ohmique
V_{conc}	Tension de concentration
ΔG	Variation d'enthalpie (énergie) libre de Gibbs
ΔH	Variation d'enthalpie
F	Constante de Faraday (96485 C/mol)
R	Constante des gaz parfaits (8,314 J/K/mol)
K	Constante de Boltzmann
V_{pac}	Tension de la pile à combustible
n	Nombre d'électrons échangée lors de la réaction
j_l	Densité de courant limite
j	Densité de courant dans la cellule
β	Coefficient de transfert d'électron
P_{H_2}	Pressions relatives d'hydrogène
P_{O_2}	Pressions relatives d'oxygène
P_{H_2O}	Pressions relatives de l'eau
i_e	Courant de l'électrolyseur
n_{H_2}	Débit ou taux d'hydrogène (mol/s)
η_F	Rendement ou efficacité faradique
η_{th}	Rendement thermodynamique
η_{mat}	Rendement de la matière
η_{vol}	Rendement voltaïque

η_{pac}	Rendement de la pile à combustible
G	Le rayonnement global
I	Le rayonnement direct
D	Le rayonnement diffus
h	La hauteur du Soleil
ρ	Albédo du sol
IG	Irradiation globale journalière
IG_0	Irradiation globale journalière hors atmosphère
S	Durée d'ensoleillement
D_j	La durée du jour
σ	Fraction d'insolation
E_c	Energie consommée
E_p	Energie produite
P_r	Pression du réservoir
P_{ch}	Puissance de la charge
P_{pv}	Puissance du générateur photovoltaïque
P_{pac}	Puissance de la pile à combustible
P_{ele}	Puissance de l'électrolyseur

Sommaire

<i>Remerciements</i>	i
<i>Dédicace</i>	ii
<i>المخلص</i>	iii
<i>Resumé</i>	iv
<i>Abstract</i>	v
<i>Liste des figures</i>	vi
<i>Liste des tableaux</i>	vii
<i>Nomenclature</i>	viii

Introduction générale

<i>Introduction générale</i>	1
------------------------------------	---

Chapitre I : Etat de l'art sur les systèmes hybrides et les générateurs PV

<i>I.1. Introduction</i>	4
<i>I.2. Production d'électricité dans le monde</i>	4
<i>I.3. Production d'électricité en Algérie</i>	6
<i>I.4. Etat de l'art sur les systèmes hybrides</i>	9
<i>I.5. Générateur photovoltaïque</i>	11
I.5.1. Principe de la conversion photovoltaïque	11
I.5.2. Modélisation de la cellule PV	12
I.5.3. Caractéristiques électriques d'une cellule PV	13
I.5.4. Puissance crête d'une cellule PV	15
I.5.5. Facteur de forme d'une cellule PV	15
I.5.6 Rendement d'une cellule PV	15
I.5.7. Influence de l'éclairement solaire	15
I.5.8. Influence de la température	16

<i>I.6. Technologies des cellules solaires PV</i>	17
I.6.1. Cellules monocristallines	17
I.6.2. Cellules polycristallines	17
I.6.3. Cellules amorphes	17
<i>I.7. Association des cellules PV</i>	18
I.7.1. Notion de cellule, module, panneau et champ PV	18
I.7.2. Regroupement de cellule PV	19
<i>I.8. Protection des panneaux PV</i>	20
I.8.1. Protection par diode ‘by-pass’ (en parallèle)	20
I.8.2. Protection par diode ‘anti-retour’ (en série)	20
<i>I.9. Types des systèmes PV</i>	20
I.9.1. Les systèmes PV autonomes	21
I.9.2. Les systèmes hybrides	21
I.9.3. Les systèmes connectés au réseau	22
<i>I.10. Conclusion</i>	23

Chapitre II : Convertisseurs DC/DC et commandes MPPT

<i>II.1. Introduction</i>	24
<i>II.2. Description du système photovoltaïque</i>	24
<i>II.3. Les convertisseurs statiques DC/DC</i>	25
II.3.1. Définition	25
II.3.2. Types des convertisseur DC/DC	25
➤ Convertisseur dévolteur (Buck)	25
➤ Convertisseur survolteur (Boost)	26
➤ Convertisseur dévolteur/survolteur (Buck/Boost)	27
<i>II.4. Commandes MPPT</i>	27
II.4.1. Définition et principe de la commande MPPT	27

II.4.2. Classification des commandes MPPT.....	27
➤ Méthodes directes	28
➤ Méthodes indirectes	28
II.4.3. Techniques de commandes MPPT.....	29
➤ Méthode de perturbation et observation (P&O).....	29
➤ Méthode P&O indirecte (avec régulateur PID)	31
➤ Méthode basée sur la logique floue.....	32
II.5. Conclusion.....	34

Chapitre III : Simulation des commandes MPPT sous différentes conditions météorologiques

III.1. Introduction.....	35
III.2. Simulation du système photovoltaïque	35
III.3. Résultats obtenus et discussion	38
III.4. Conclusion.....	45

Chapitre IV : Etude et modélisation de l'électrolyseur et de la pile à combustible

IV.1. Introduction.....	46
IV.2. L'hydrogène comme vecteur énergétique intermédiaire	46
IV.3. Fondamentale de l'électrolyse de l'eau.....	47
IV.3.1. Définition	47
IV.3.2. Technologies des électrolyseurs d'eau	47
IV.3.3. Principe de l'électrolyseur de type PEM.....	48
IV.3.4. Modélisation de l'électrolyseur et ses caractéristiques électriques.....	49
IV.3.5. Effet de la température sur la tension d'électrolyseur.....	52
IV.3.6. Débit d'hydrogène et rendement de l'électrolyseur	53
IV.4. Présentation de la pile à combustible (PAC)	54
IV.4.1. Définition et principe de fonctionnement.....	54

IV.4.2. Différents types des piles à combustible	55
IV.4.3. Modélisation statique de la pile à combustible	56
IV.4.4. Caractéristiques électriques de la pile à combustible	57
IV.4.5. Influence de la température et de la pression sur les caractéristiques de la pile à combustible	60
IV.4.6. Rendement de la pile à combustible	62
IV.5. Conclusion	64

Chapitre V : Simulation du système hybride PV/Hydrogène et discussion des résultats

V.1. Introduction	65
V.2. Description du système hybride PV/Hydrogène	65
V.3. Présentation du site étudié	66
V.4. Dimensionnement des composants du système hybride PV/Hydrogène	67
V.4.1. Besoins énergétiques et profil de charge	67
V.4.2. Dimensionnement du générateur photovoltaïque	69
V.4.3. Dimensionnement de la pile à combustible et l'électrolyseur	70
V.4.4. Réservoir de stockage	70
V.5. Gestion d'énergie du système hybride	71
V.6. Résultats de simulation du système hybride PV/Hydrogène	72
V.7. Conclusion	80

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives	80
---	----

Références bibliographiques

Références bibliographiques	80
-----------------------------------	----

Introduction générale

Introduction générale

Contexte énergétique et statistiques

L'énergie est la complication essentielle pour l'homme dans le monde actuel, l'exploitation de toutes ses sources est la question que le futur va poser à l'homme. Avec la diminution du stock mondial d'hydrocarbures d'origine (pétrole, gaz et charbon), la demande énergétique est croissante, une grave pollution menace les organismes vivants et l'environnement, c'est pour cela tous les pays du monde cherchent ou bien ils orientent leurs perspectives aux énergies renouvelables. Comme son nom l'indique, une énergie renouvelable est une énergie utilisant des éléments naturels, renouvelés plus rapidement qu'ils sont consommés. A ce propos, il est intéressant de citer des appellations qu'on peut classer parmi des énergies renouvelables et respectueuses de l'environnement telles que : l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, l'énergie géothermique et l'énergie solaire photovoltaïque ou thermique [1-2].

La part des énergies renouvelables dans la production d'électricité reste encore faible. En effet 27% d'énergie produite sur la planète est d'origine renouvelable dont 16% représente la part de l'hydroélectricité. L'essentiel étant toujours issu des combustibles fossiles, tels que le pétrole, le gaz ou le charbon (62%) et par l'énergie nucléaire (10%) [1-3]. L'utilisation des énergies renouvelables comme alternative écologique aux combustibles fossiles et au nucléaire, s'avère une solution très attrayante du fait qu'elles sont inépuisables, non polluantes, très adaptées à la production décentralisée et les technologies sont actuellement au point pour utiliser ces énergies au quotidien. Leur exploitation pour la production d'électricité est très rentable dans les sites isolés ; là où l'extension du réseau électrique serait un échec financier.

Problématique et Objectifs

L'une des énergies renouvelables la plus connue et développée dernièrement on trouve l'énergie solaire photovoltaïque, elle a été découverte par E. Becquerel en 1839, elle consiste à convertir directement le rayonnement électromagnétique solaire en électricité. L'énergie photovoltaïque a l'avantage d'être non polluante, souple et fiable. Néanmoins, sa production

reste tributaire des aléas météorologiques et n'est pas uniformément répartie, ce qui influe négativement à l'approvisionnement continu en énergie électrique demandée par l'utilisateur. Une méthode pour surmonter ce problème consiste à intégrer l'installation photovoltaïque avec d'autres sources d'énergie telles que le diesel, les batteries ou la pile à combustible (PAC). Le générateur de secours diesel pour l'énergie photovoltaïque est en mesure d'assurer une continuité de 24 heures. Cependant, il présente un certain nombre d'inconvénients importants tels que le bruit et la pollution par les gaz d'échappement. L'utilisation des batteries est la méthode la plus utilisée à l'installation des systèmes PV, elles ont de très bons rendements, de l'ordre de 75 à 85%, et un prix très compétitif, mais elles présentent aussi des inconvénients comme la courte durée de vie et le taux élevé d'autodécharge surtout dans les mois d'été.

Dans cette thèse ; la solution qu'on a proposée pour éviter les inconvénients sus-cités est d'utiliser l'hydrogène pour stocker l'énergie. L'hydrogène est produit par un électrolyseur couplé au générateur PV, stocké sans perte importante dans un réservoir, puis converti en électricité à l'aide d'une pile à combustible. Ce système, appelé système hybride PV/Hydrogène, présente de nombreux avantages : peu de bruit, grande fiabilité, peu de contraintes de fonctionnement et une maintenance limitée. L'alimentation électrique par la source photovoltaïque avec une pile à combustible est une option très attrayante à utiliser, car le système d'alimentation est caractérisé par de nombreux avantages tels que l'efficacité, la réponse de charge rapide, la production modulaire et le carburant. Un système hybride PV/Hydrogène peut être en mesure de résoudre le problème inhérent de la production intermittente d'électricité photovoltaïque. Contrairement à une batterie de stockage, qui représente également une option de secours attrayante, telle qu'une réponse rapide, une construction modulaire et une flexibilité, la pile à combustible peut produire de l'électricité pendant une durée illimitée pour soutenir le générateur photovoltaïque. Par conséquent, une alimentation continue en énergie de haute qualité générée par le système hybride PV/Hydrogène est possible de jour comme de nuit.

L'objectif de ce travail est la contribution à la modélisation d'un système hybride PV/Hydrogène pour assurer la continuité d'alimentation en énergie électrique d'une maison située dans un site isolé. L'excès de l'énergie produite par le GPV est orienté vers un électrolyseur produisant l'hydrogène stocké dans un réservoir, ce dernier alimente la pile par l'hydrogène pour générer les besoins énergétiques lorsque le GPV n'est pas en mesure de répondre aux exigences de la charge. Pour cela, nous nous sommes intéressés à modéliser chaque composant entrant dans la constitution du système hybride individuellement et chercher à

optimiser son fonctionnement. Ce système est géré par une méthode proposée de gestion du flux énergétique répondant aux besoins exprimés par la demande en énergie. La modélisation des éléments du système hybride a été présentée et exécuté sous l'environnement MATLAB/Simulink.

Organisation de la thèse

La thèse comporte cinq chapitres :

Dans le premier chapitre, nous allons présenter des statistiques sur la production de l'électricité au niveau mondial et national et un état de l'art sur les systèmes hybrides et les générateurs photovoltaïques.

Au deuxième chapitre, nous allons décrire succinctement les techniques de commandes MPPT choisies dans ce travail : P&O, P&O modifiée (indirecte) et la commande basée sur la logique floue, ces techniques génèrent le rapport cyclique optimal au convertisseur DC/DC approprié afin d'extraire la puissance maximale du GPV.

Le troisième chapitre portera sur la simulation des commandes MPPT citées au deuxième chapitre et l'interprétation des résultats obtenus.

Dans le quatrième chapitre, une étude et modélisation des composants de production et de stockage de l'hydrogène (l'électrolyseur et la pile à combustible) seront présentées.

Le cinquième chapitre, proposera un schéma global du système hybride PV/hydrogène et la méthode de gestion d'énergie, les résultats de simulations sous différents scénarios seront discutés et interprétés.

En fin, une conclusion générale et de perspectives couronnent cette thèse pour récapituler nos résultats de simulation ainsi que les analyses faites à cet égard.

Chapitre I

Etat de l'art sur les systèmes hybrides et les générateurs photovoltaïques

I.1. Introduction

Actuellement, la principale source d'énergie utilisée pour produire de l'électricité, est celle issue des combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel et charbon). Or, il s'avère que ces ressources sont présentes en quantités limitées et non renouvelables, et que leurs combustions engendrent des gaz à effet de serre. Les sources d'énergies renouvelables présentent l'avantage d'être disponibles en quantité illimitée et d'être non émettrices de gaz à effet de serre excepté lors de la fabrication des systèmes utilisant la source renouvelable. Leurs exploitations sont un moyen de répondre aux besoins en énergie tout en préservant l'environnement. Les principales sources d'énergies renouvelables sont l'hydraulique, le solaire, l'éolien, la biomasse, la géothermie et l'énergie marine.

L'énergie solaire photovoltaïque présente de nombreux avantages, tels qu'ils sont inépuisables et sans pollution, silencieux et avec une efficacité de conversion électrique indépendante de la taille. Cependant, elle subit des grandes variations de puissance en raison des conditions météorologiques intermittentes, ces phénomènes peuvent entraîner des problèmes de fonctionnement. Une méthode pour surmonter ce problème consiste à intégrer l'installation photovoltaïque avec d'autres sources d'énergie pour former un système hybride. Dans ce chapitre, nous allons présenter un état d'art sur les différentes études menées sur les systèmes hybride PV/hydrogène, ainsi que quelques notions de base relatives aux générateurs PV.

I.2. Production d'électricité dans le monde

La production d'électricité renouvelable a atteint 7200 TWh en 2019, soit 27% de la production mondiale [4]. Cette part reste supérieure à la production d'électricité d'origine nucléaire (10,5% en 2019), mais largement inférieure à l'électricité produite à partir des combustibles fossiles (62%). Les 0,5% restants sont apportés par la combustion des déchets qualifiés de non renouvelable. La figure (I.1) montre la répartition de la production d'électricité mondiale en 2019.

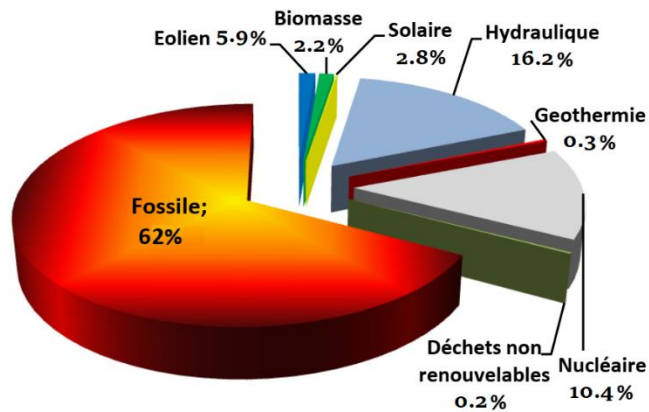


Figure I.1 : Répartition de la production d'électricité mondiale en 2019 [5]

Comme mentionner précédemment, l'électricité renouvelable provient de six sources distinctes. L'hydroélectricité est la principale d'entre elles avec 61,39% du total renouvelable. L'énergie éolienne est devenue en 2019 la seconde source d'énergie renouvelable pour la production d'électricité (20% du total). Elle devance aujourd'hui la filière biomasse, qui rassemble la biomasse solide, la biomasse liquide, le biogaz et les déchets ménagers renouvelables (7,6%). Suivent la géothermie (1,3%), le solaire (9,7%) qui rassemble les centrales photovoltaïques et les centrales solaires thermiques (héliio-thermodynamiques), et les énergies marines (0,01%) [4,5]. La répartition de la production d'électricité mondiale, d'origine renouvelable, en 2019, est présentée sur la figure (I.2).

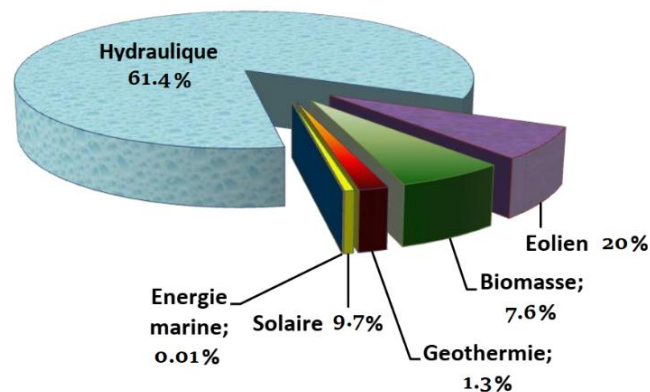


Figure I.2 : Répartition de la production d'électricité mondiale d'origine renouvelable en 2019 [5]

Malgré sa forte contribution dans la production d'électricité mondiale, d'origine renouvelable, la filière hydraulique croît lentement sur la période 1999-2019 (+2,1% par an en moyenne), cache le dynamisme des autres filières renouvelables. Sans l'hydraulique, la croissance de la production d'électricité renouvelable serait de 11,6 % par an en moyenne depuis

1999. Donc : la part des filières renouvelables sans l'hydraulique a plus que triplé dans la production mondiale d'électricité, passant de 3 % du total en 2009 à 10 % du total en 2019 [4,5].

1.3. Production d'électricité en Algérie

En Algérie, la production d'électricité a atteint 81.3 TWh en 2019, le gaz naturel est la principale source de cette production, car il représente près de 98% de l'électricité totale avec 1% restant provenaient de petites centrales hydroélectriques [6]. La croissance de la population a un impact direct sur les besoins en énergie. La croissance du nombre de consommateurs d'année en année semble linéaire. Alors que la croissance de l'énergie a passé de 45 TWh en 2010 à 76 TWh en 2017, ces augmentations sont attribuées à la croissance rapide du secteur de résidence, les secteurs commerciaux et industriels. La figure (I.3) montre la croissance de production de l'énergie électrique en Algérie dans les années passées.

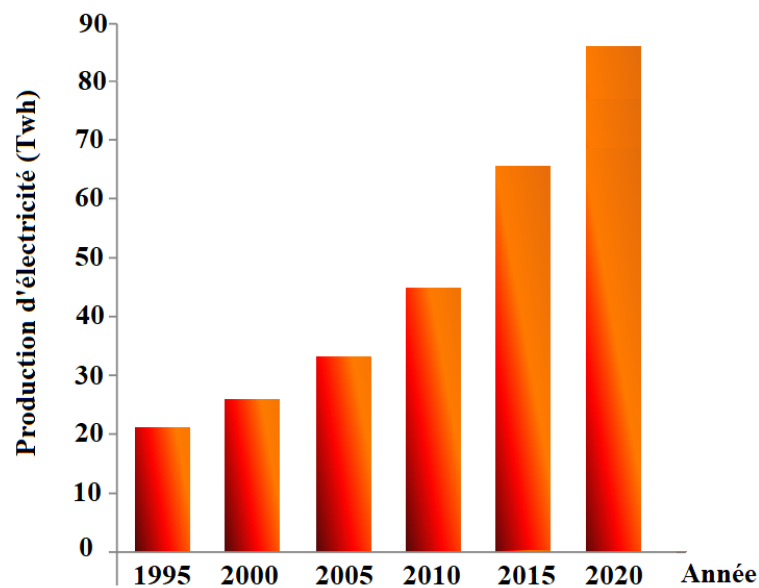


Figure I.3: Croissance de production d'électricité en Algérie [6]

Le gouvernement algérien avait pris conscience de l'importance des énergies renouvelables. Il avait compris que les projets des énergies renouvelables pourraient être utilisés comme des outils pour la gestion des réserves et le développement durable des communautés du désert. Il y a généralement des zones où un générateur avec un moteur diesel ou à essence présente un problème de transport de carburant et peut être potentiellement nocifs pour l'environnement. Le gouvernement a lancé des programmes qui visent à augmenter l'utilisation de technologies d'énergies renouvelables en Algérie, par conséquent fournissant de l'énergie verte dans les villages isolés et de lutte contre le changement climatique mondiaux, notamment

les émissions de gaz à effet de serre [7]. De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m^2 est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m²/an aux régions côtière, 1900 kWh/m²/an aux hauts plateaux et 2600 kWh/m²/an au Sud du pays.

Tableau I.1: Taux d'ensoleillement par région en Algérie [6]

Région	Côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Irradiation moyenne (kWh/m ² /an)	1700	1900	2600

La diversité et le potentiel des sources d'énergies renouvelables que l'Algérie possède sont uniques au monde, notamment le gisement solaire. Malgré cela, la part des énergies renouvelables dans la production électrique nationale est très faible avec moins de 1% tirée principalement de l'hydroélectricité. Ceci est dû aux faibles capacités d'énergie renouvelable installées jusqu'à présent. En effet, l'Algérie recense près de 270 MW de capacité hydroélectrique, principalement répartie en 100 MW installée à Jijel et 74 MW à Bejaia [7]. La filière thermique est la seconde capacité avec 30 MW installée en hybridation avec une turbine à gaz à Hassi R'Mel. Cette centrale hybride (gaz-solaire) est d'une capacité totale de 150 MW et est opérationnelle depuis 2011. En Juillet 2014, l'Algérie a inauguré la première ferme éolienne composée de 12 aérogénérateurs pour une capacité globale de 10 MW. Cette ferme installée à Adrar entre dans le cadre de la mise en place de quelques centrales pilotes de faible capacité en vue d'acquérir de l'expérience en la matière et collecter des données sur le fonctionnement de ces systèmes principalement dans les régions sahariennes et les hauts plateaux. Une autre centrale PV pilote expérimentale est aussi installée à Ghardaïa d'une capacité de 1.1 MW. Cette centrale est composée de quatre champs PV de technologies différentes.

Le gouvernement algérien a adopté fin février 2015 son programme de développement des énergies renouvelables 2015-2030. Une première phase du programme, démarrée en 2011,

avait permis la réalisation de projets pilotes et d'études sur le potentiel national. Le nouveau programme précise les objectifs d'installations d'ici à 2030 [7] :

- 13 575 MWc de solaire photovoltaïque ;
- 5 010 MW d'éolien ;
- 2 000 MW de solaire thermodynamique (CSP) ;
- 1 000 MW de biomasse (valorisation des déchets) ;
- 400 MW de cogénération ;
- 15 MW de géothermie.

Le total s'élève ainsi à 22 GW, ce programme doit permettre à l'Algérie de produire 27% de son électricité à partir des énergies renouvelables d'ici à 2030, afin d'épargner ses réserves en gaz.

Ce programme consacre la stratégie de l'Algérie qui vise à développer une véritable industrie du solaire. Le solaire devrait atteindre d'ici 2030 plus de 27% de la production nationale d'électricité. Malgré un potentiel assez faible, le programme n'exclut pas l'éolien qui constitue le second axe de développement et dont la part devrait avoisiner les 2% de la production d'électricité en 2030. L'Algérie prévoit également l'installation de quelques unités de taille expérimentale afin de tester les différentes technologies en matière de biomasse, de géothermie et de dessalement des eaux saumâtres par les différentes filières d'énergie renouvelable.

Ce projet est suivi du mégaprojet de 15 GW à l'horizon de 2035. Une première tranche de capacité de 1000 MW a été déjà lancée. Cinq wilayas de sud ont été choisies pour la réalisation de ce projet, avec une capacité s'étalant de 50 à 300 MW.

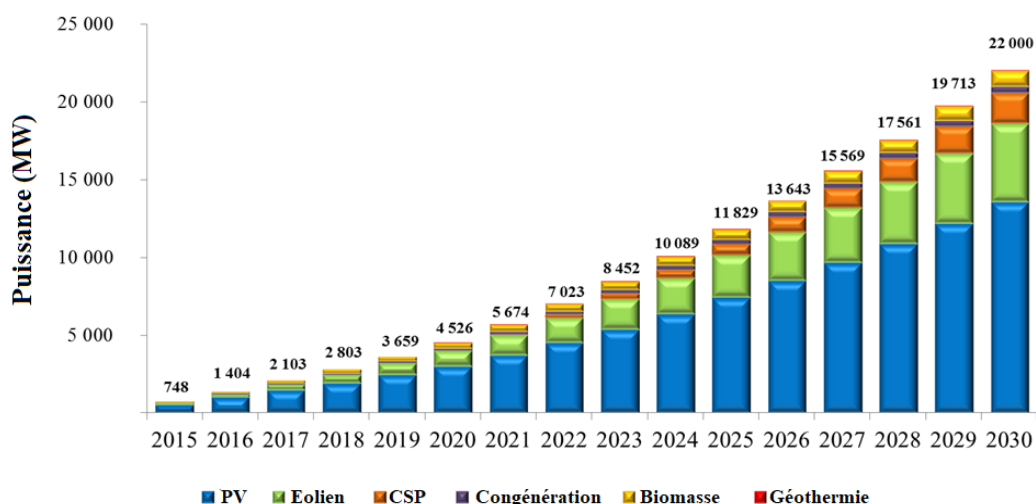


Figure I.4 : Progression des énergies renouvelables dans la production nationale [7]

I.4. Etat de l'art sur les systèmes hybrides

Les systèmes hybrides notamment les systèmes PV/Hydrogène ont fait des progrès importants dans la génération d'énergie renouvelable. Cette combinaison fonctionne en alimentant l'électrolyseur par les champs PV pour générer l'hydrogène nécessaire au fonctionnement de la pile à combustible. L'hydrogène généré peut être stocké dans un réservoir dit réservoir d'hydrogène. Le dimensionnement des composants, la gestion d'énergie et la rentabilité des systèmes hybrides ont fait l'objet de nombreuses recherches pour concevoir des systèmes d'énergie hybride PV/PAC autonomes. Nous présentons ci-dessous quelques articles sur travaux utilisant les générateurs photovoltaïques et pile à combustible comme source énergétique :

- S.Rahman et K.Tam [8], ont présenté une étude d'intégration des piles à combustible avec des panneaux PV dans des systèmes autonomes ou connectées au réseau, pour répondre à une demande variable de charge. Des prototypes ont été testés aux Etats-Unis et au Japon. Le fonctionnement hybride s'avère être bien et le système surmonte le problème d'intermittence de la production solaire.
- D.Rekioua et *al* [9], ont étudié des différents systèmes hybrides PV/Pile à combustible pour le but de produire de l'électricité sans interruption dans les zones reculées. Les résultats obtenus montrent l'efficacité de ces systèmes.
- G.Bayrak et C.Mehmet [10] ont développé un modèle de simulation en MATLAB d'un système hybride PV/PAC connecté au réseau électrique. Une pile à combustible à oxyde solide (SOFC) de 5 kW a été utilisé pour prendre en charge le bus DC du système de production d'énergie hybride.
- Le travail de Z.Jiang [11] a basé sur la conception d'un système hybride PV/pile à combustible/batterie mené d'une méthode de gestion d'énergie, afin que la combinaison puisse être utilisée comme source d'alimentation fiable. Dans cet article, la structure du système hybride est décrite et les stratégies de commande pour la gestion d'énergie de ce système sont discutées. Le système d'alimentation hybride proposé est ensuite vérifié par simulation numérique.
- C.Ghenai et *al* [12] ont utilisé dans leur étude une analyse technico-économique pour concevoir un système hybride PV/pile à combustible hors réseau, afin d'optimiser le système pour répondre à la charge électrique souhaitée d'une communauté résidentielle située dans une région désertique.

- J.Kupecki et al [13] ont introduit la technologie Power to Gas (PTG) basé sur une unité d'électrolyse à haute température. L'électrolyseur à oxyde solide (SOE) assure une conversion très efficace de l'électricité intermittente de l'éolienne et du GPV en hydrogène. Du fait du caractère imprévisible de ces sources, le réseau connaît des déséquilibres qui déstabilisent le système énergétique. La solution, sous la forme d'un électrolyseur à haute température, atténue le problème en couplage des réseaux électrique et gaz.
- Mosayeb et al [14], ont parlé d'un nouvel algorithme hybride appelé BMO-DE et des bénéfices réalisés comparés à d'autres algorithmes lors de son application dans un micro-réseau à 33 bus se composant d'éoliennes, de panneaux PV et de piles à combustible de type MCFC-CHP.
- Djafour et al [15], ont étudié et simulé un système de couplage direct (sans MPPT) entre les panneaux photovoltaïques et l'électrolyseur pour améliorer la production de l'hydrogène. La simulation du couplage avec l'électrolyseur a montré la possibilité d'améliorer l'efficacité du système en utilisant un système de commutation permettant de choisir le nombre d'électrolyseurs pour ajuster la tension et le courant afin que la courbe caractéristique de la charge corresponde à la courbe caractéristique du GPV.
- L.Luo et al [16] ont proposé un nouveau système de gestion de l'énergie pour un système connecté au réseau avec diverses ressources d'énergie renouvelable, notamment un système photovoltaïque (PV), une éolienne, une pile à combustible, une micro-turbine et un système de stockage d'énergie par batterie. Un algorithme de chauve-souris modifié (MBA) est utilisé. L'algorithme proposé a conduit à un calcul plus rapide du meilleur emplacement et à un résultat plus précis par rapport à l'algorithme génétique (GA) et à l'algorithme d'optimisation des essaims de particules (PSO). Les résultats de la simulation démontrent que l'utilisation d'un modèle PV pratique dans un environnement réel améliore la précision du système de gestion de l'énergie et diminue le coût opérationnel total du micro-réseau connecté au réseau.
- Un article publié récemment de S.Singh et al [17] présente un système d'énergie hybride basé sur la pile à combustible et le solaire photovoltaïque, ce système a été proposé pour répondre à la demande de charge électrique d'un petit centre communautaire en Inde. Une optimisation des coûts a été effectuée pour déterminer les cotes des composants du système PV et Hydrogène. L'objectif était de minimiser le coût actualisé de l'électricité de ce système autonome.

On peut donc conclure qu'une étude approfondie a été rapportée dans la littérature concernant la modélisation, l'optimisation et la gestion de l'énergie pour les systèmes hybrides PV/Hydrogène.

I.5. Générateur photovoltaïque

I.5.1. Principe de la conversion photovoltaïque

La cellule solaire photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie du rayonnement solaire et la transforme directement en courant électrique. Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charges libres est très faible par rapport aux métaux. Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devienne libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction).

La cellule la plus commune d'aujourd'hui est une cellule simple au silicium de jonction PN avec un rendement qui arrive jusqu'à environ 20%. Ce matériau semi-conducteur comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type *N* et dopée de type *P* (Figure I.5). Cette jonction PN crée une barrière de potentiel, les contacts de la face éclairée de la cellule ont la structure d'une grille afin de n'occulter qu'une faible partie de la surface (5 à 10%), la face arrière peut être entièrement métallisée.

Lorsque les grains de lumière (les photons) heurtent la surface du matériau semiconducteur, ils transfèrent leur énergie aux atomes de la matière. Ces photons libèrent des électrons de ces atomes, créant des trous et des électrons. Ceci engendre donc une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel crée un champ électrique E qui draine les porteurs libres vers les contacts métalliques des régions *P* et *N*. Il en résulte alors un courant électrique et une différence de potentiel dans la cellule PV. Le courant et la tension fournis par une cellule PV dépendent de différents paramètres que nous allons expliciter dans la suite de ce chapitre [18,19].

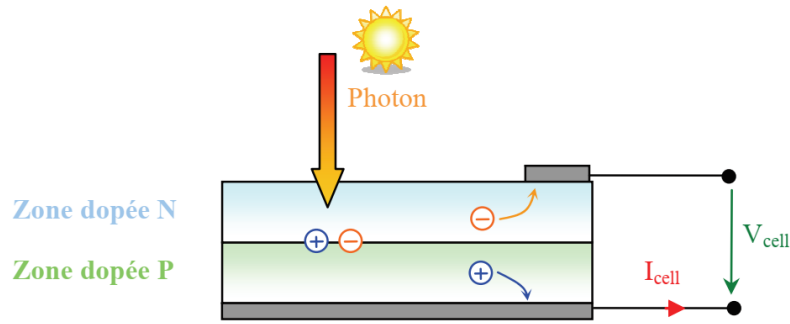


Figure I.5: L'effet photovoltaïque [19]

I.5.2. Modélisation de la cellule PV

Pour étudier le comportement des cellules PV, sous la variation de l'éclairement solaire et de la température, des circuits électriques équivalents et des modèles mathématiques sont présentés. De nombreux modèles électriques de complexité variable, sont proposés dans la littérature [18-20]. La figure (I.6) montre les modèles électriques de cellules PV les plus connus :

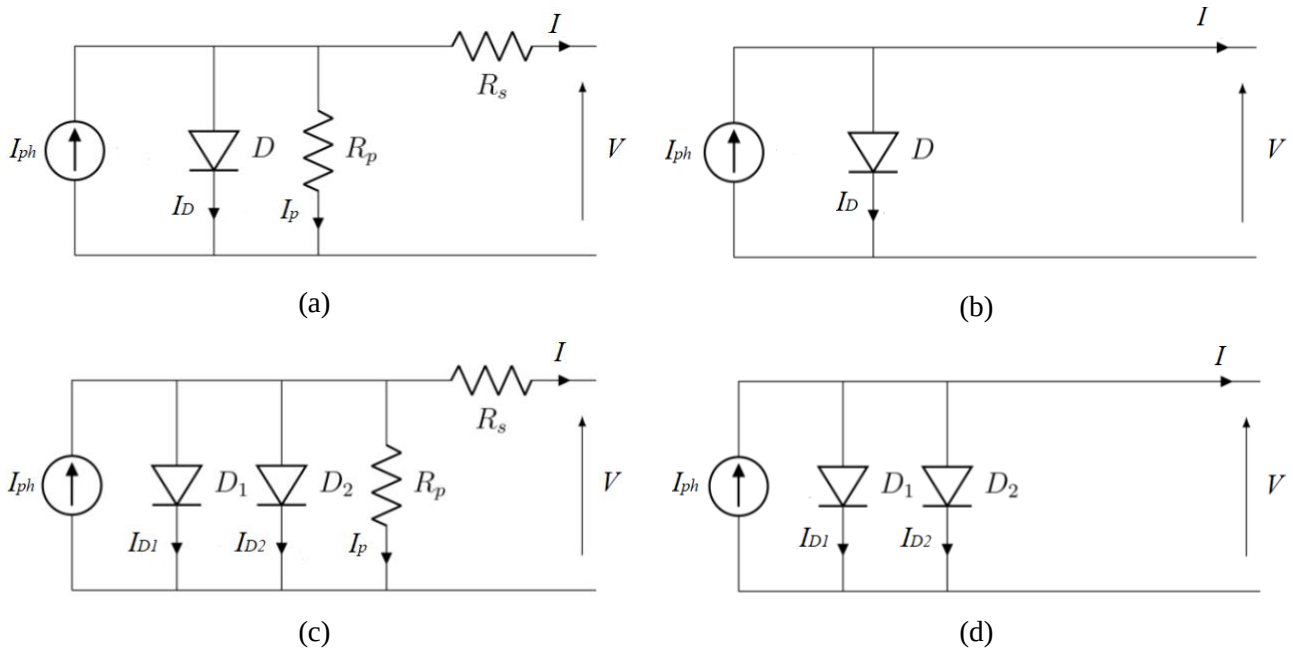


Figure I.6: Modèles électriques de la cellule photovoltaïque [18-20]

Dans notre travail, on utilise le modèle à une diode, une cellule PV est modélisée par une source de courant continue shuntée par une diode. Pour tenir compte des phénomènes physiques au niveau de la cellule, le modèle est complété par deux résistances : la résistance série R_s et la résistance shunt (parallèle) R_p comme le montre la figure (I.6.a), les résistances R_s et R_p représentent respectivement les résistances des contacts métalliques et de fuites de la jonction PN. En générale, la résistance R_p est très élevée et la résistance R_s est très faible.

Le courant photopile a pour expression : $I = I_{ph} - I_d - I_p$

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{qV_d}{kT}\right) - 1 \right] - \frac{V_d}{R_p} \quad (I.1)$$

Le courant I_{ph} est en fonction de l'éclairement E comme suit : $I_{ph} = I_{cc} \left(\frac{E}{1000} \right)$

En utilisant la loi des mailles, la tension de la diode est : $V_d = V + R_s I$

Donc, le courant I en fonction de la tension V s'écrit sous la forme implicite suivant :

$$I = I_{cc} \left(\frac{E}{1000} \right) - I_s \left[\exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{\eta kT}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (I.2)$$

où

E : l'éclairement solaire (W/m^2).

I_s : courant de saturation inverse de la diode.

q : charge d'électron: $q = 1.6 \times 10^{-19}$ Coulomb

k : constante de Boltzmann : $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K

η : le facteur d'idéalité du diode, généralement entre 1 et 2.

$kT/q \approx 25$ mV à $T = 300$ K.

I_{cc} : courant de court-circuit.

V_{co} : tension du circuit ouvert.

En général, le courant de sortie d'un panneau PV contient N_s cellules connectées en série et N_p chaînes connectées en parallèle est fourni par l'un des équations suivantes [20-23] :

$$I = N_p \cdot I_{cc} \left(\frac{E}{1000} \right) - N_p \cdot I_s \left[\exp\left(\frac{q\left(\frac{V}{N_s} + \frac{R_s I}{N_p}\right)}{\eta kT}\right) - 1 \right] - \left(\frac{\frac{N_p}{N_s} V + R_s I}{R_p} \right) \quad (I.3)$$

$$I = N_p \cdot I_{cc} \left(\frac{E}{1000} \right) - N_p \cdot I_s \left[\exp\left(\frac{q(N_p V + N_s R_s I)}{N_p N_s \eta kT}\right) - 1 \right] - \left(\frac{N_p V + N_s R_s I}{N_s R_p} \right) \quad (I.4)$$

I.5.3. Caractéristiques électriques d'une cellule PV

En utilisant l'équation implicite du courant délivré par la cellule photovoltaïque, on peut tracer ses caractéristiques électriques : courant-tension et puissance-tension. Les caractéristiques $I = f(V)$ et $P = f(V)$ sont représentées sur la figure suivante :

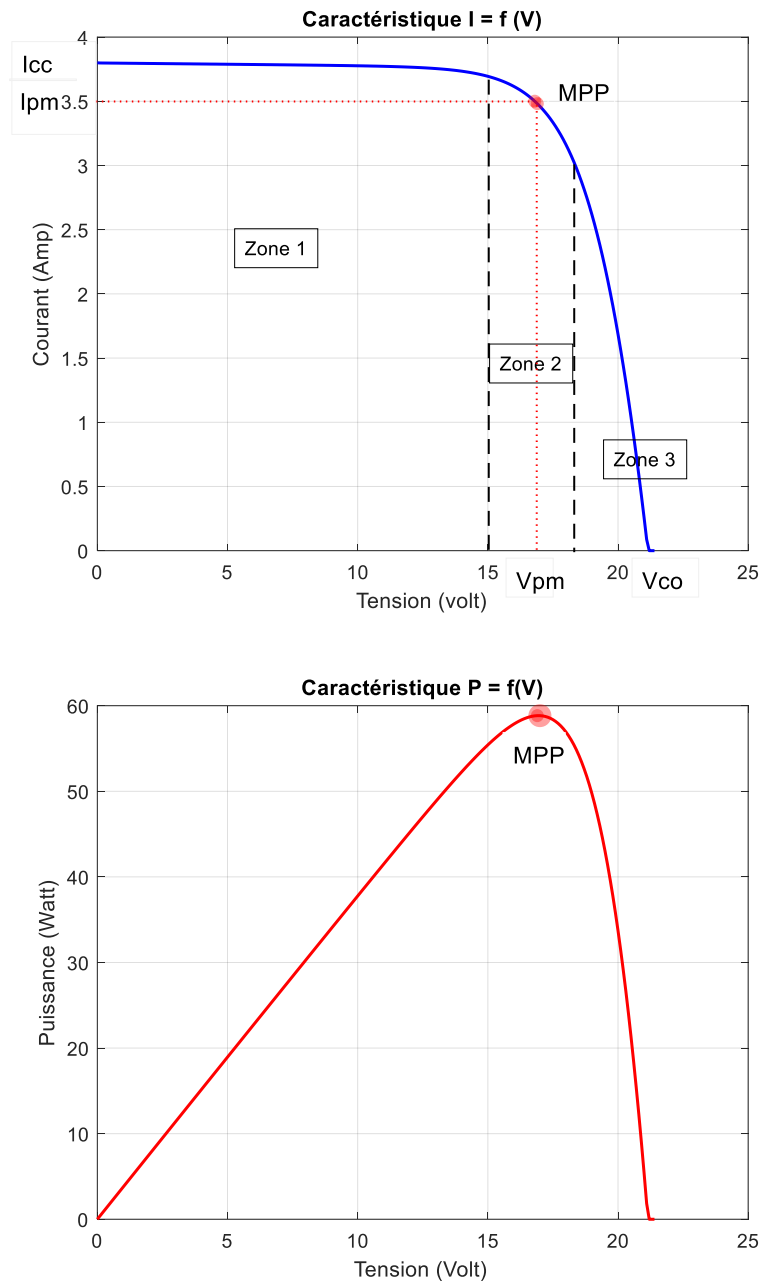


Figure I.7 : Caractéristiques électriques d'un panneau PV

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque, pour un éclairement et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement ; seule la courbe $I = f(V)$ est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque. On distingue trois zones essentielles [24] :

- Fonctionnement comme générateur de courant : le point de fonctionnement appartient à la zone (1). Le courant est proche du courant de court-circuit I_{cc} et la tension est faible.
- Fonctionnement comme générateur de tension : le point de fonctionnement appartient à la zone (3). La tension est proche de la tension à vide V_{co} et le courant est faible.

- Fonctionnement optimal : quand le point de fonctionnement appartient à la zone (2), l'utilisation est meilleure ; la puissance absorbée est maximisée.

La puissance débitée par la cellule dépend du point de fonctionnement de cette dernière, c'est le produit de l'intensité du courant débité et la tension entre ses bornes.

I.5.4. Puissance crête d'une cellule PV

La puissance crête d'une photopile, notée W_c (Watt crête), représente la puissance électrique maximum délivrée dans les conditions suivantes dites conditions STC (Standard Test Conditions), c'est-à-dire sous un spectre AM1.5, une température de 25°C et un éclairement de 1000 W/m².

En d'autres termes, 1 W_c délivre une puissance électrique de 1 W quand il est soumis à un éclairement solaire de 1000 W/m².

I.5.5. Facteur de forme d'une cellule PV

C'est le rapport entre la puissance crête et le produit $I_{cc} \cdot V_{co}$, ce rapport traduit la forme rectangulaire de la caractéristique $I = f(V)$.

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot V_{co}} = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad (I.5)$$

Les valeurs typiques de facteur de forme vont environ de 60 à 80%.

I.5.6 Rendement d'une cellule PV

On définit le rendement énergétique d'une cellule PV par le rapport entre la puissance maximum et la puissance incidente :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_m \cdot V_m}{E \cdot S} \quad (I.6)$$

S : surface active des panneaux (m²)

I.5.7. Influence de l'éclairement solaire

L'énergie électrique produite par une cellule photovoltaïque dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. La figure suivante présente la variation des caractéristiques d'un panneau PV à différents niveaux d'éclairement :

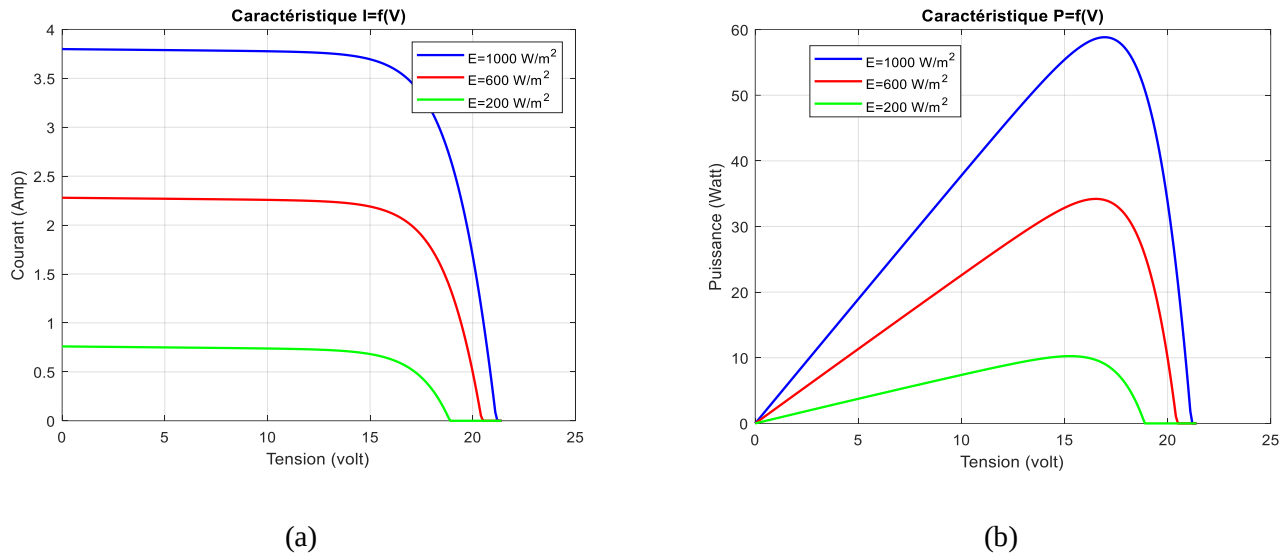


Figure I.8 : Influence de l'éclairement sur les caractéristiques électriques d'un panneau PV : (a) Courant-tension ; (b) Puissance-tension

On remarque que le courant est directement proportionnel à l'éclairement. La tension par contre n'est pas très dégradée lorsque la lumière baisse ; mais ne dépend pas de la surface, elle n'est fonction que du matériau. La puissance optimale du module est proportionnelle à l'éclairement et par conséquent, lorsque l'éclairement solaire baisse, le facteur de forme augmente et la courbe devient carrée.

I.5.8. Influence de la température

La température est aussi un paramètre important qui influe directement sur la puissance électrique produite par les panneaux PV. La figure suivante représente le comportement d'un panneau PV sous un éclairement de 1000 W/m^2 et à des températures entre 25 et 65°C :

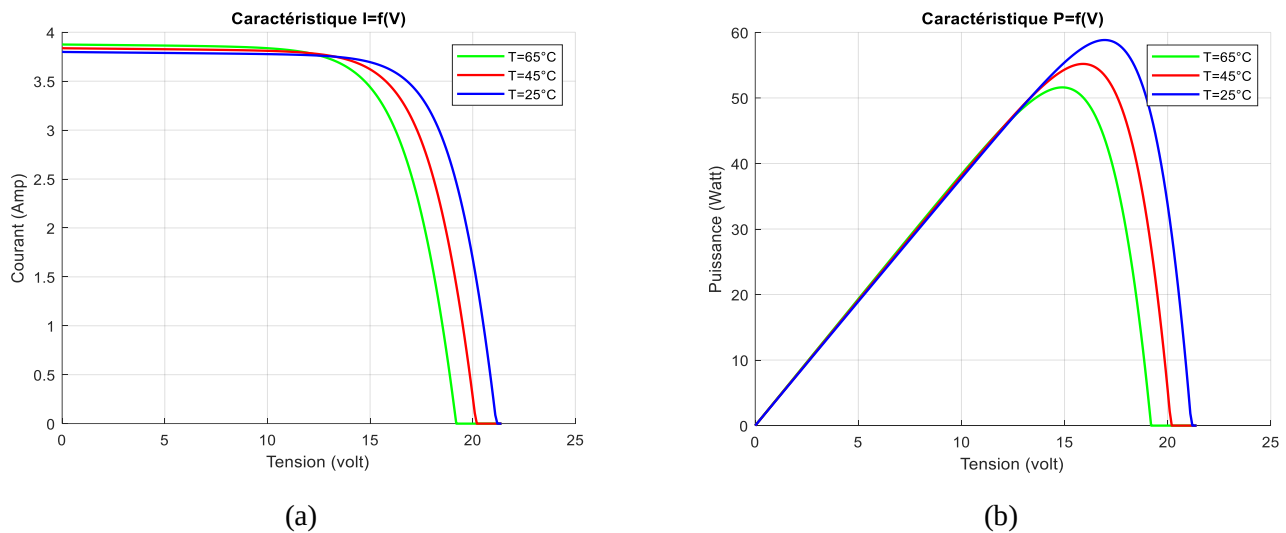


Figure I.9 : Influence de la température sur les caractéristiques électriques d'un panneau PV : (a) Courant-tension ; (b) Puissance-tension

D'après la figure (I.9), l'augmentation de la température entraîne d'une part, une légère augmentation du photo-courant, et d'autre part une diminution de la tension du circuit ouvert, en raison principalement de la diminution de la largeur de la bande interdite du matériau. Par conséquence, cette augmentation de température entraînerait une diminution de la puissance maximale disponible et de la tension (0.06% par °C), une augmentation du courant (0.4% par °C) et une diminution du rendement et de facteur de forme.

I.6. Technologies des cellules solaires PV

Le matériau le plus répandu dans les photopiles ou cellules solaires est le silicium. Il est dit tétravalent, cela signifie qu'un atome de silicium peut se lier avec quatre autres atomes de même nature. Il existe plusieurs types de cellules solaires [18,20] :

I.6.1. Cellules monocristallines

- Première génération de photopiles.
- Forme de plaquettes rondes, carrées ou pseudo-carrées, de surface bleu-gris uniforme.
- Rendement excellent de 16% et jusqu'à 21%.
- Méthode de production laborieuse et difficile, et donc, très chère.

I.6.2. Cellules polycristallines

Elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en plusieurs cristaux dont les orientations sont différentes.

- Rendement de 11% et jusqu'à 15%.
- Coût de production moins élevé.
- Procédé moins gourmand en énergie.

I.6.3. Cellules amorphes

Ces cellules sont composées d'un support en verre ou en matière synthétique sur lequel est disposé une fine couche de silicium (l'organisation des atomes n'est plus régulière comme dans un cristal). Elles ont une surface uniformément sombre.

- Rendement de seulement 6 à 10% par module.
- Coût de production bien plus bas.
- Appliquées dans les petits produits de consommation : montres, calculatrices, mais peu utilisées dans le cadre des installations solaires.
- Mieux réagir à la lumière diffuse et donc, elles sont plus performantes à une température élevée.

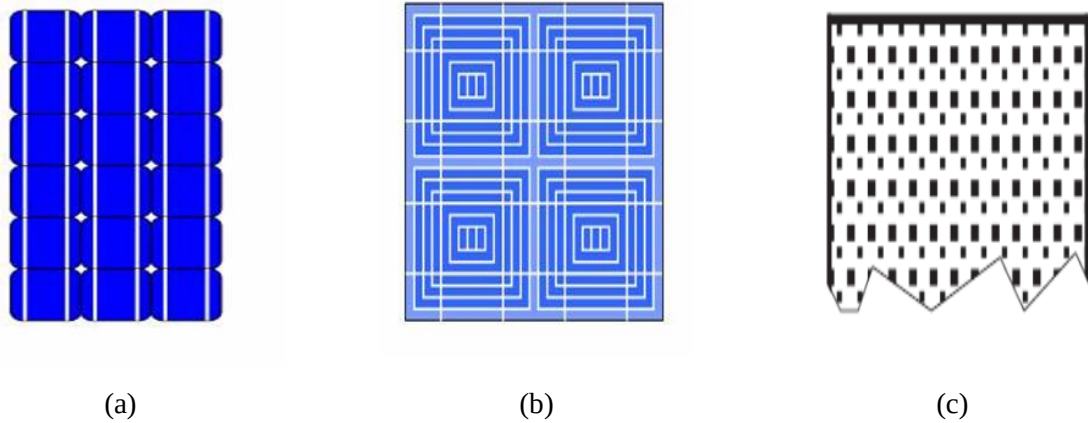


Figure I.10 : Technologies des cellules PV : (a) Monocristalline ; (b) Polycristalline ; (c) amorphe

I.7. Association des cellules PV

I.7.1. Notion de cellule, module, panneau et champ PV

La cellule solaire PV de forme ronde ou carrée est l'élément de base, un ensemble de cellules forment un module solaire, dans un module les cellules sont reliées électriquement entre elles et encapsulées, donc protégées des agents extérieurs. Plusieurs modules forment un panneau solaire. Plusieurs panneaux forment un système solaire auquel viennent s'ajouter des protections, un régulateur, un système de stockage de l'énergie (batterie) des appareils de contrôle et de mesure, un onduleur ...

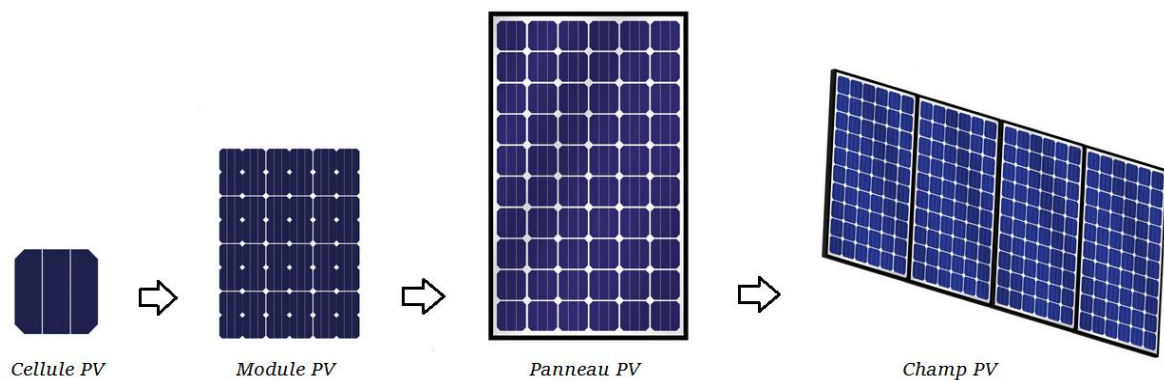


Figure I.11 : Cellule, module, panneau et champ PV

I.7.2. Regroupement de cellule PV

Regroupement en série

En mettant N_s cellules PV identiques en série, le pôle positif (+) de chaque cellule est relié au pôle négatif (-) de la cellule suivante, le courant de la branche reste le même et la tension de cette branche est N_s fois plus grande que celle d'une cellule PV.

$$\begin{cases} I = I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I_{N_s} \\ V = V_1 + V_2 + V_3 \dots + V_{N_s} = N_s \cdot V_i \end{cases} \quad (I.7)$$

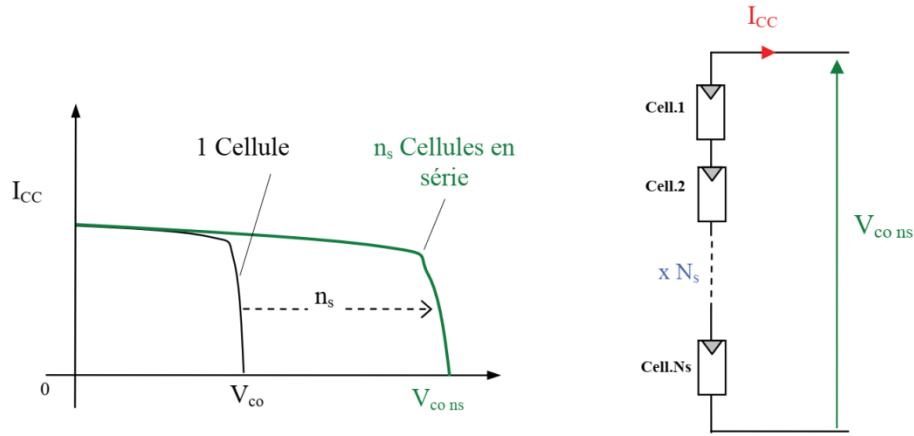


Figure I.12 : Association des cellules PV identiques en série et sa caractéristique [19]

Regroupement en parallèle

En mettant N_p cellules identiques en parallèle, tous les pôles positifs (+) sont reliés entre eux et tous les pôles négatifs (-) sont reliés entre eux, la tension de la branche reste la même et le courant de cette branche est N_p fois le courant d'une cellule PV.

$$\begin{cases} I = I_1 + I_2 + I_3 \dots + I_{N_p} = N_p I_i \\ V = V_1 = V_2 = V_3 = \dots = V_{N_p} \end{cases} \quad (I.8)$$

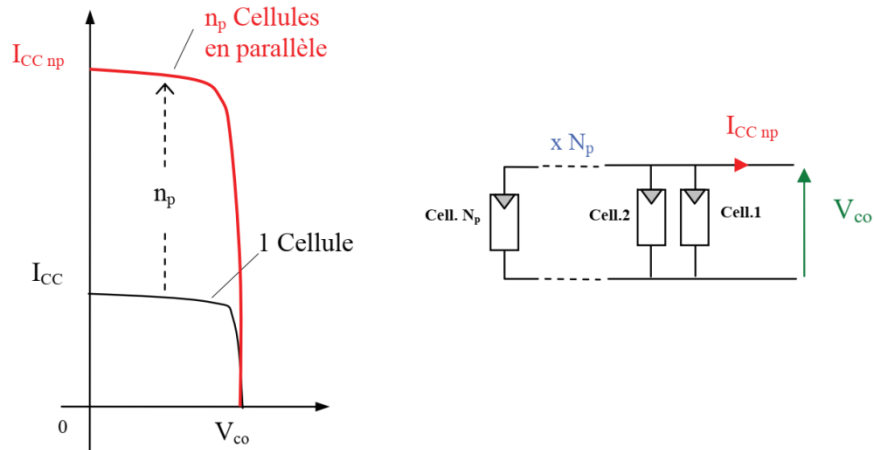


Figure I.13 : Association des cellules PV identiques en parallèle et leur caractéristique [19]

I.8. Protection des panneaux PV

I.8.1. Protection par diode 'by-pass' (en parallèle)

Lorsqu'une partie de module est accidentellement couverte, le courant produit par le reste du champ PV continuer à circuler à travers les cellules cachées, toute la tension du module peut chuter via ces diodes. Dans ce cas, ces dernières se comportent en récepteur et risquent l'échauffement et la destruction. Ce phénomène est dit 'hot spot' ou point chaud, pour éviter ce phénomène, on installe en parallèle sur les modules des diodes qui dérive le courant en cas d'obstruction de cellule. La diode parallèle limite la tension inverse par sa tension directe puisqu'elle devient passante.

I.8.2. Protection par diode 'anti-retour' (en série)

Pour la protection des modules en cas d'endommagement, on branche en série des diodes anti-retour. Une cellule PV se comporte comme récepteur lorsqu'elle ne reçoit pas du rayonnement solaire (nuit, ciel nuageux, ...), elle consomme alors du courant comme une simple lampe, donc pour éviter la décharge de la batterie dans le module, on installe des diodes de blocage en série entre la batterie et le module.

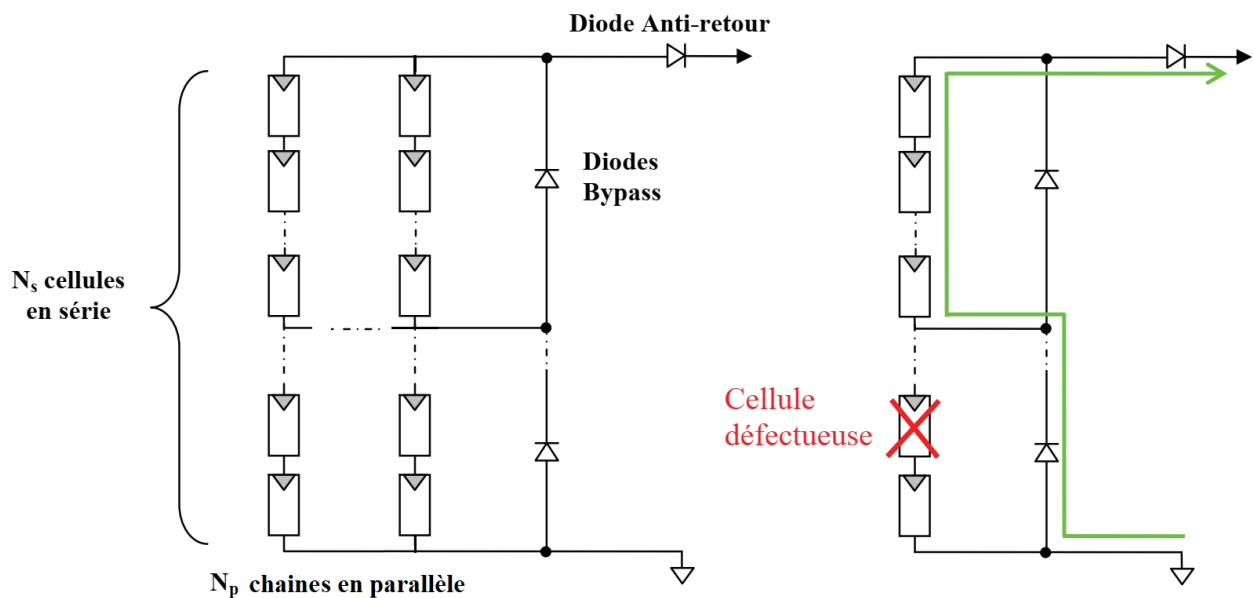


Figure I.14 : Protection du panneau PV par diodes 'bypass' et 'anti-retour' [19]

I.9. Types des systèmes PV

Les genres des systèmes photovoltaïques que l'on rencontre généralement sont les systèmes PV autonomes, les systèmes hybrides et les systèmes connectés au réseau. Les deux

premiers sont indépendants du service public de distribution d'électricité ; on les retrouve souvent dans les régions éloignées.

I.9.1. Les systèmes PV autonomes

Une installation photovoltaïque autonome est une installation qui produit de l'électricité grâce au soleil, mais qui fonctionne indépendamment du réseau électrique, ils peuvent comporter des accumulateurs qui emmagasinent l'énergie produite par les modules au cours de la journée servant la nuit ou lors des périodes où le rayonnement solaire est insuffisant. Ces systèmes peuvent également répondre aux besoins d'une application (par exemple, le pompage de l'eau) sans recours aux accumulateurs. En règle générale, les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie électrique la plus économique.

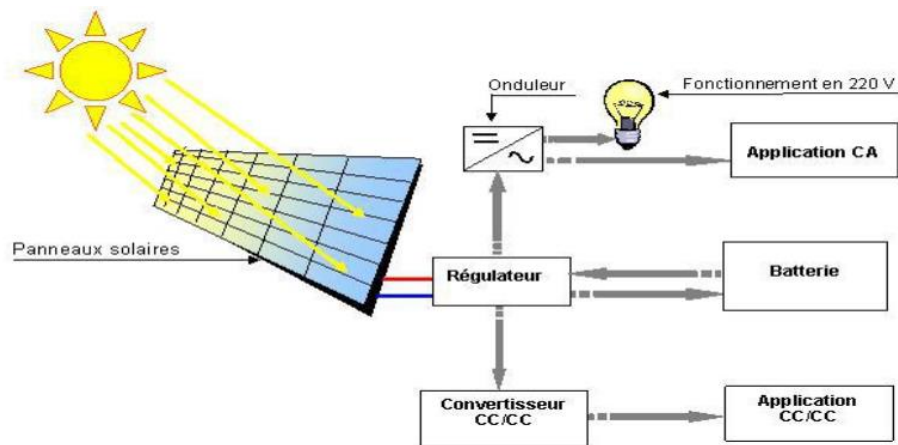


Figure I.15 : Schéma descriptif d'un système PV autonome

I.9.2. Les systèmes hybrides

Les systèmes hybrides, qui sont également indépendants des réseaux de distribution d'électricité, sont composés d'un générateur photovoltaïque combiné à une autre source d'énergie comme une éolienne ou à un groupe électrogène à combustible, ou aux deux à la fois. Un tel système s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée, lorsqu'il n'y a pas assez de lumière solaire à certains moments de l'année, ou si on désire diminuer l'investissement dans les champs de modules photovoltaïques et les batteries d'accumulateurs.

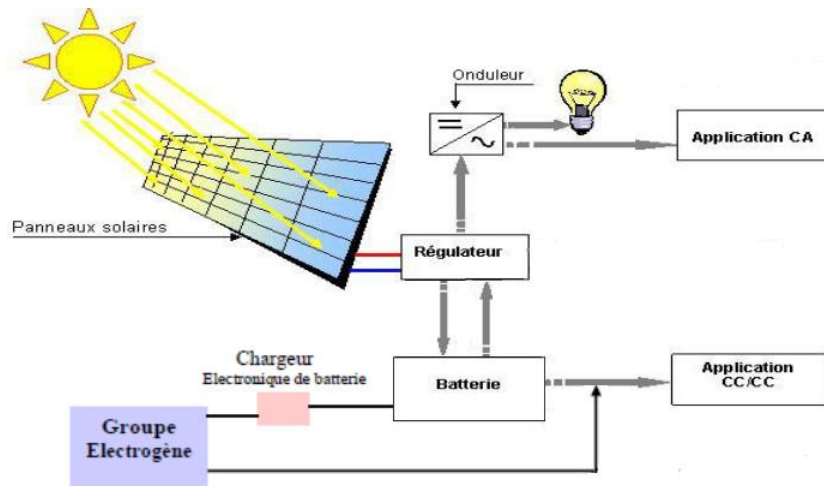


Figure I.16 : Schéma descriptif d'un système hybride

I.9.3. Les systèmes connectés au réseau

Les systèmes de production d'énergie photovoltaïque connectés à un réseau sont une résultante de la tendance à la décentralisation du réseau électrique. L'énergie est produite plus près des lieux de consommation sans demander de grandes centrales thermiques ou hydroélectriques. Au fil du temps, les systèmes connectés à un réseau réduiront la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution. Un système connecté à un réseau produit sa propre électricité et achemine son excédent d'énergie vers le réseau, auprès duquel il s'approvisionne au besoin ; ces transferts éliminent le besoin d'acheter et d'entretenir une batterie d'accumulateurs. Il est toujours possible d'utiliser ceux-ci pour servir d'alimentation d'appoint lorsqu'il y a une panne de réseau, mais ce n'est pas nécessaire.

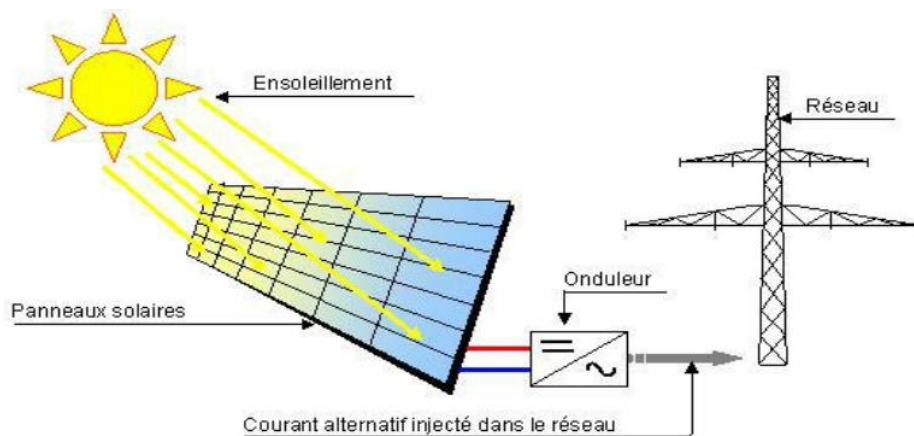


Figure I.17 : Schéma descriptif d'un système connecté au réseau

I.10. Conclusion

Dans ce chapitre, un état de l'art sur les systèmes hybrides et les générateurs PV est présenté. La première partie était consacrée à des statistiques de production d'énergie à différents types au niveau mondiale et nationale. La deuxième partie était dédiée aux générateurs photovoltaïques où nous avons rappelé quelques généralités liées au domaine photovoltaïque : l'effet photovoltaïque, caractéristiques électriques, technologies des cellules, associations de panneaux photovoltaïque, etc. Dans le chapitre qui suit, nous allons présenter les différentes techniques de commande MPPT qui seront simulées, comparées puis discutées.

Chapitre II

Convertisseurs DC/DC et commandes MPPT

II.1. Introduction

Lors du fonctionnement d'un générateur PV, le point de puissance maximale PPM peut être dégradé suite aux variations des conditions météorologiques tel que l'éclairement solaire et la température. L'adaptation entre la source et la charge a lieu en variant le rapport cyclique du convertisseur DC/DC où la recherche de ce point de puissance maximale sera réalisée automatiquement. Ceci est tout à fait possible en adoptant une des approches d'adaptation connue sous le nom de la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking).

Dans la littérature, plusieurs techniques MPPT sont étudiées et présentées. Citons les méthodes à contre réaction de tension et de courant, la méthode P&O, la méthode de l'incrémental conductance et les méthodes basées sur l'intelligence artificielle comme la logique floue et les réseaux de neurones [20-23, 25-29].

Dans ce chapitre, nous allons présenter quelques techniques de commande MPPT générant le rapport cyclique α au convertisseur DC/DC (hacheur). Les techniques étudiées sont choisies en raison de leurs efficacités et robustesses.

II.2. Description du système photovoltaïque

Un système photovoltaïque est constitué de quatre blocs comme le montre la figure (II.1). Le premier bloc représente la source d'énergie (Générateur photovoltaïque), le second bloc est un convertisseur statique DC/DC, le troisième bloc représente le système de commande et le quatrième bloc représente la charge. Le convertisseur statique fait l'adaptation entre la source (GPV) et la charge pour un transfert de puissance maximal pour n'importe quelles conditions de fonctionnement (rayonnement, température, variation de la charge, etc.), il est utilisé comme unité de traitement de puissance avec des algorithmes MPPT en ajustant le rapport cyclique. Ce rapport est calculé par l'algorithme MPPT et varie entre 0 et 1 [26].

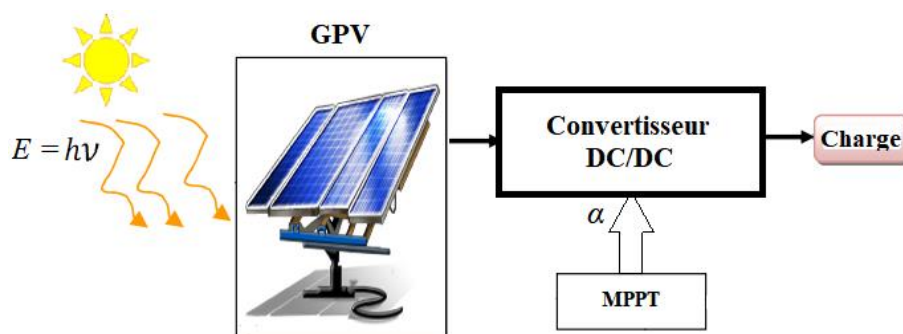


Figure II.1: Schéma fonctionnel du système PV complet

II.3. Convertisseurs statiques DC/DC

II.3.1. Définition

Un convertisseur DC/DC ou hacheur est un dispositif de l'électronique de puissance mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs commandés et qui permet de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant) [28-30]. Un convertisseur DC/DC est essentiellement composé d'un interrupteur K (de type IGBT ou MOSFET), d'une diode D , des capacités et des selfs, l'interrupteur K est commandé par un signal PWM avec une période de découpage fixe T_d et un rapport cyclique variable α .

Les convertisseurs DC/DC se comportent extérieurement comme des transformateurs à courant continu, en ce sens que les tensions et courants d'entrée et de sortie sont reliés approximativement par l'équation :

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{I_i}{I_0} = M \quad (\text{II.1})$$

où

M est le rapport de conversion généralement réglable.

Dans l'équation (II.1) on néglige les pertes de puissance, autrement dit, la puissance entre l'entrée et la sortie est conservée. On remarquera que, lorsque le convertisseur abaisse le niveau de tension, il augmente le niveau de courant. Inversement, s'il élève le niveau de tension, il diminue le niveau de courant.

II.3.2. Types des convertisseur DC/DC

L'utilisation des convertisseurs DC/DC dans les systèmes de conversion photovoltaïque est tout à fait adéquate, étant donné que le générateur photovoltaïque est une source de courant continu, tandis que le récepteur qui est généralement la batterie. Il existe différents types de hacheurs. Si la tension délivrée en sortie est inférieure à la tension appliquée en entrée, le hacheur est dit abaisseur ou Buck. Sinon, on dit qu'il s'agit d'un hacheur élévateur ou Boost. Il existe également des hacheurs capables de fonctionner dans les deux sens (Buck-Boost).

➤ Convertisseur dévolteur (Buck)

Le convertisseur dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur Buck ou hacheur série. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure, où le rapport de conversion change avec le rapport cyclique du

commutateur. La conduction des deux interrupteurs est complémentaire, lorsque K est fermé, D est ouvert ; et quand K est ouvert, D est fermé. Durant chaque période, K est immédiatement fermé à $t = 0$ jusqu'à αT_d et ouvert de αT_d à T_d . Il existe deux modes de fonctionnement selon le courant dans l'inductance qui s'annule (mode de conduction discontinu) ou non (mode de conduction continu). Nous nous intéressons au deuxième cas qui est le plus important [25, 28-31].

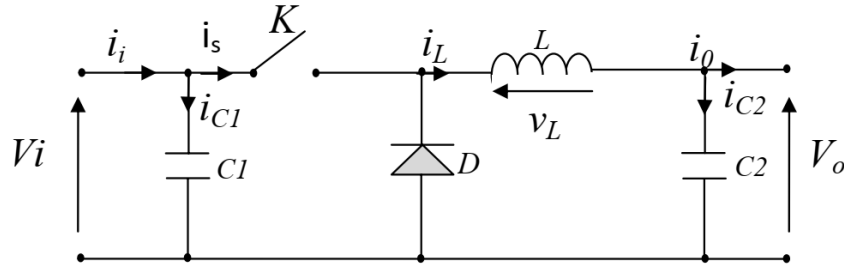


Figure II.2: Convertisseur DC/DC de type Buck [30]

En régime continu, les valeurs moyennes de la tension de sortie V_o et du courant de sortie I_o sont données par [29] :

$$V_o = \alpha V_i \quad (\text{II.1})$$

$$I_o = \frac{I_i}{\alpha} \quad (\text{II.2})$$

➤ Convertisseur survolteur (Boost)

Un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de hacheur Boost ou hacheur parallèle permet de convertir une tension d'entrée en une tension de sortie supérieure. Le circuit de base d'un convertisseur Boost est celui de la figure (II.3). Comme le hacheur Buck, lorsque K est fermé D est ouvert ; et quand K est ouvert, D est fermé [25, 28-31].

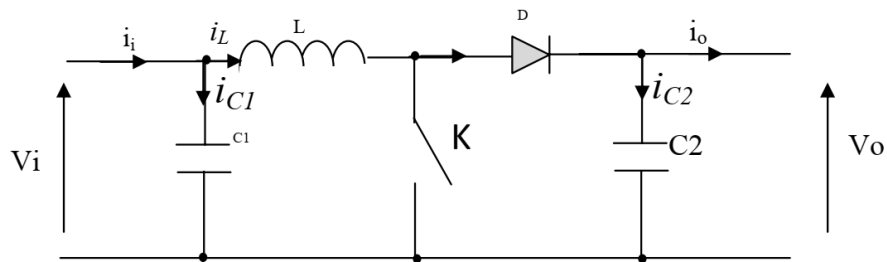


Figure II.3: Convertisseur DC/DC de type Boost [30]

En régime continu, on trouve [29] :

$$V_0 = \frac{V_i}{1 - \alpha} \quad (\text{II.3})$$

$$I_0 = I_i(1 - \alpha) \quad (\text{II.4})$$

➤ **Convertisseur dévolteur/survolteur (Buck/Boost)**

Ce dernier a acquis les caractéristiques et les propriétés électriques des deux types évoqués précédemment. Il présente donc une sorte d'un transformateur hybride (abaisseur/élevateur) pour une tension d'entrée/sortie continue ; son schéma de base est illustré par la figure (II.4) :

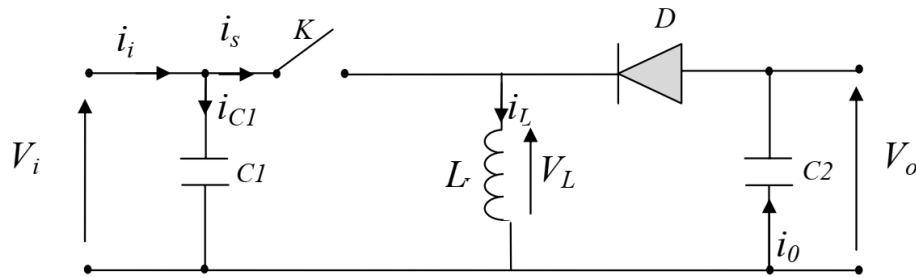


Figure II.4: Convertisseur DC/DC de type Buck-Boost [30]

En régime continue, la tension et le courant de sortie sont données par [29] :

$$I_0 = -\frac{(1 - \alpha)I_i}{\alpha} \quad (\text{II.5})$$

$$V_0 = -\frac{\alpha V_i}{(1 - \alpha)} \quad (\text{II.6})$$

II.4. Commandes MPPT

II.4.1. Définition et principe de la commande MPPT

Par définition, une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking), associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un GPV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quel que soit les conditions météorologiques (éclairage et température), la commande du convertisseur met le système au point de fonctionnement maximum (V_{pm} et I_{pm}). La chaîne de conversion photovoltaïque sera optimisée à travers un convertisseur statique commandé par une MPPT.

II.4.2. Classification des commandes MPPT

Au cours des dernières décennies, de nombreuses méthodes pour trouver le MPP ont été développées. Ces techniques diffèrent dans de nombreux aspects tels que les capteurs

nécessaires, la complexité, le coût, la portée de l'efficacité, la vitesse de convergence, le suivi correct lors de changement du température et/ou d'éclairement, le matériel nécessaire pour la mise en œuvre, ...

La classification des algorithmes du suiveur peut être basée sur la fonction des techniques ou des stratégies de commande utilisées. Ainsi, deux catégories peuvent être présentées : Méthodes directes et indirectes [32,33].

➤ **Méthodes directes**

Ce type de commande MPPT détermine le point de fonctionnement optimal (MPP) à partir des courants, tensions ou puissances mesurés dans le système. Il peut donc réagir à des changements imprévisibles du fonctionnement du GPV.

Généralement, ces procédures sont basées sur un algorithme de recherche, avec lequel le maximum de la courbe de puissance est déterminé sans interruption du fonctionnement. Pour cela, la tension du point de fonctionnement est incrémentée dans des intervalles réguliers. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée. Le point de fonctionnement réel oscille alors autour du MPP. Ce principe de base peut être préservé par d'autres algorithmes contre des erreurs d'interprétation. Ces erreurs peuvent survenir, par exemple, à cause d'une mauvaise direction de recherche, résultant d'une hausse de puissance qui, est due à une augmentation rapide du niveau de rayonnement. La détermination de la valeur de la puissance du générateur PV, indispensable pour la recherche du MPP, nécessite la mesure de la tension et du courant du générateur PV, ainsi que la multiplication de ces deux variables.

Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de différenciation, la méthode de Perturbation et Observation (P&O), l'incrément de la conductance, etc....

➤ **Méthodes indirectes**

Ce type de commandes MPP utilise le lien existant entre les variables mesurées (I_{cc} ou V_{co}), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur.

Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser, elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a

peu de changements climatiques. Parmi ces méthodes, on trouve la méthode à contre réaction de tension ou courant, la méthode de court-circuit, etc.....

II.4.3. Techniques de commandes MPPT

De nombreuses recherches ont été développées concernant les différents algorithmes du suivi du point de puissance maximale MPP. En tenant compte des variables des paramètres du système et/ou des changements climatiques. Le schéma fonctionnel de la Figure (II.1) présente un générateur PV avec MPPT, la charge peut être alimentée à partir du GPV en utilisant MPPT, avec un contrôleur spécifique, pour suivre la puissance maximale générée par le GPV.

Ce problème de poursuite fait jusqu'à nos jours l'objet de plusieurs recherches, plusieurs méthodes ont été élaborées et utilisées [20-43]. Dans cette partie, on présentera l'aspect théorique de quelques méthodes (classiques et modernes) du suivi du point de fonctionnement à puissance maximale du système photovoltaïque et qui sont : La méthode de perturbation et observation (P&O), la méthode de P&O indirecte et la méthode basée sur la logique floue.

➤ Méthode de perturbation et observation (P&O)

La méthode de P&O est la technique MPPT la plus connue, c'est une technique largement utilisée parce qu'il a la particularité d'avoir une structure simple et peu de paramètre de mesure, pour l'utiliser on considère que le PV fonctionne à un point qui n'est pas obligatoirement le MPP.

La méthode P&O fonctionne en perturbant périodiquement la tension du panneau PV et on observe la variation de la puissance électrique délivrée à la sortie du panneau PV [22,25-27,39-40].

Si $\frac{dP}{dV} > 0$, alors la perturbation de la tension déplace le point de fonctionnement vers un point plus proche du MPP et on continue à perturber la tension dans la même direction cela va déplacer le point de fonctionnement jusqu'à l'atteinte du MPP.

Si $\frac{dP}{dV} < 0$, le point de fonctionnement s'éloigne du MPP alors on perturbe la tension avec un signe algébrique contraire au signe précédent pour déplacer le point de fonctionnement jusqu'à l'atteinte du MPP.

Si $\frac{dP}{dV} = 0$, le point de fonctionnement oscille autour du MPP.

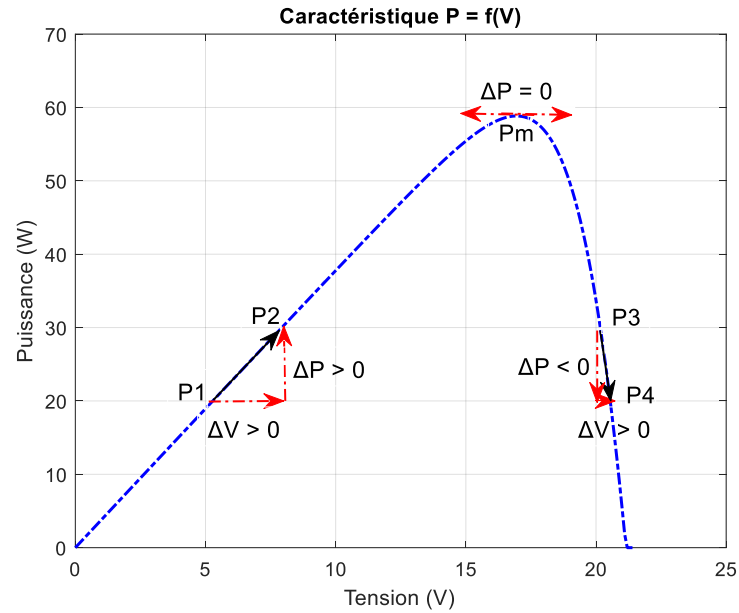


Figure II.5: Principe de la commande P&O

Le principe de cet algorithme est d'effectuer une perturbation sur la tension du panneau PV tout en agissant sur le rapport cyclique α . En effet, suite à cette perturbation, on calcule la puissance fournie par le panneau PV à l'instant k , puis on la compare à la précédente de l'instant $(k-1)$. Si la puissance augmente, on s'approche du point à maximum de puissance (MPP) et la variation du rapport cyclique est maintenue dans le même sens. Au contraire, si la puissance diminue, on s'éloigne du MPP. Alors, on doit inverser le sens de la variation du rapport cyclique α . La figure (II.6) illustre l'organigramme de la commande P&O.

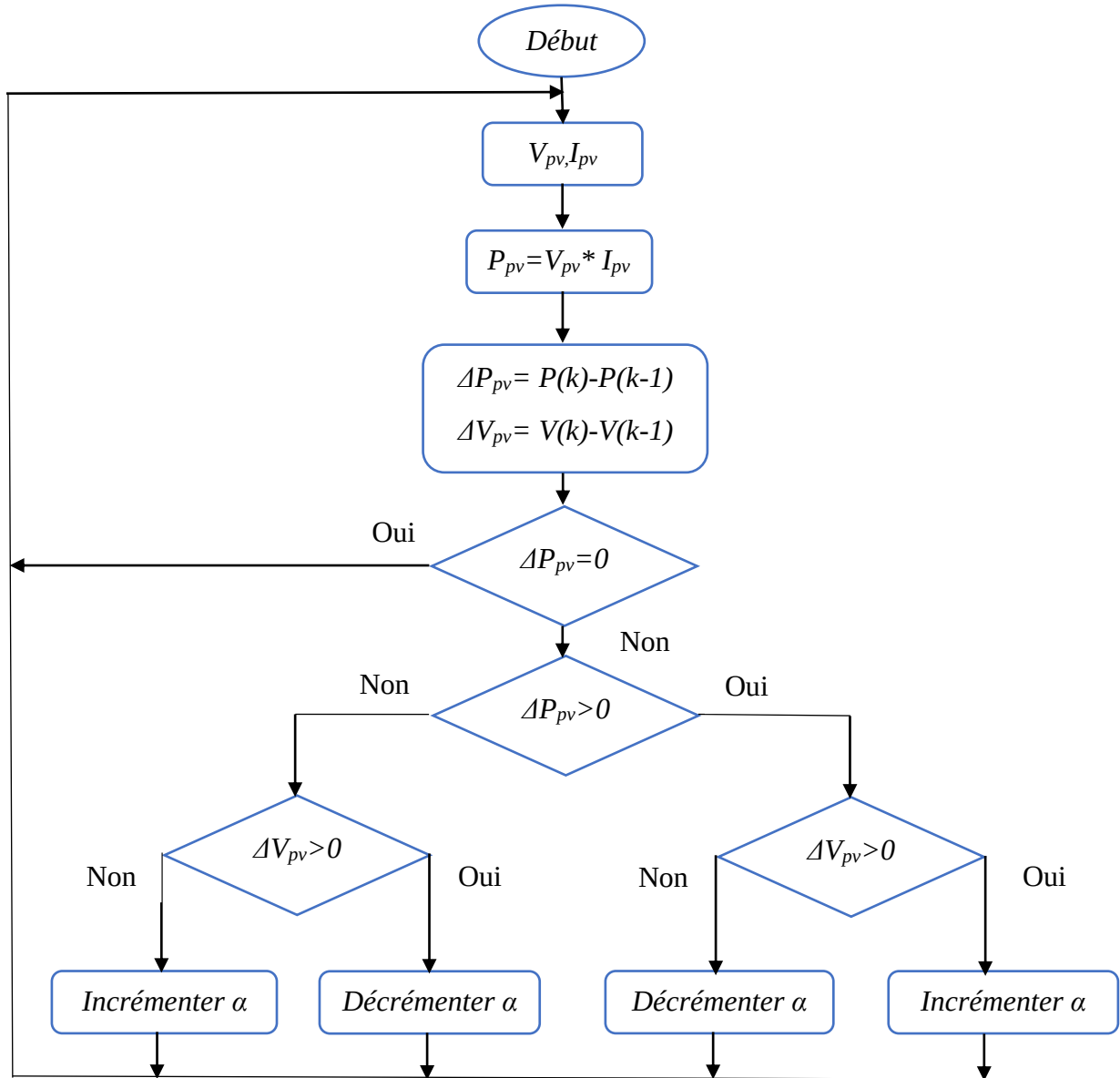


Figure II.6: Organigramme de la commande P&O

➤ Méthode P&O indirecte (avec régulateur PID)

Cette méthode est basée sur la comparaison entre la tension de sortie du contrôleur P&O appelé V_{ref} et la tension de sortie du générateur photovoltaïque V_{pv} . Dans l'étape de synthèse du contrôleur basée sur le mode du contrôle indirect, il est nécessaire de déterminer la fonction de transfert qui relie le modèle de la tension de sortie du GPV V_{pv} au rapport cyclique α . La puissance électrique de sortie est assurée par les deux étages suivants : le premier vise à générer la tension de référence V_{ref} par l'algorithme d'implémentation P&O en utilisant l'organigramme de la Figure (II.6). D'autre part, le deuxième étage vise à l'écart entre la tension de sortie, fournie par le GPV, et la tension de référence mentionnée ci-dessus, fournie par l'algorithme P&O. Cet

objectif est atteint par un contrôleur PID (Proportionnel-Intégral-Dérivé) stabilisé, fournissant ainsi le rapport cyclique souhaité [21, 34-36].

Le contrôleur (PID) est largement utilisé dans le contrôle industriel, la popularité des contrôleurs PID peut être attribuée à leurs bonnes performances dans une large gamme de conditions de fonctionnement, ainsi qu'à leur simplicité fonctionnelle. Le schéma fonctionnel de la commande P&O avec un contrôleur PID est illustré à la figure (II.7).

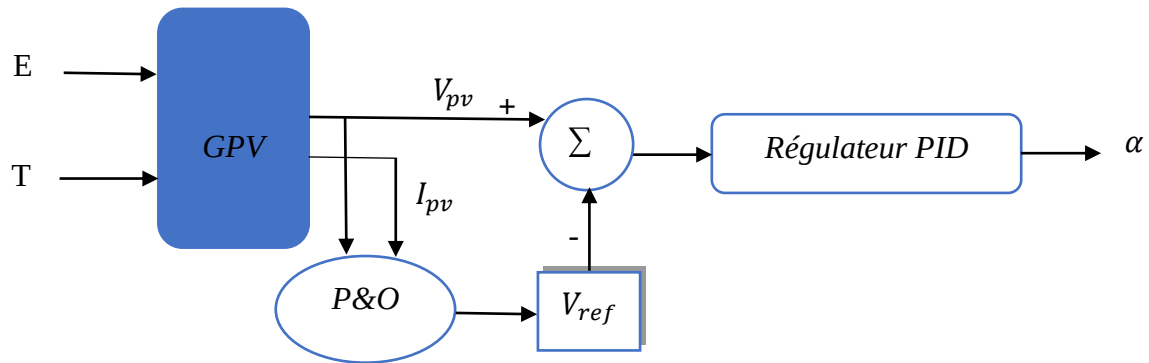


Figure II.7: Principe de la méthode P&O indirecte

La fonction de transfert générale d'un régulateur PID est décrit comme suit :

$$F(p) = K_p + \frac{K_i}{p} + K_d \cdot p \quad (\text{II.6})$$

où

K_p , K_i et K_d sont respectivement les gains proportionnel, intégral et dérivé du contrôleur PID. Ici, ces gains sont calculés à partir des paramètres du GPV aux conditions STC, ce qui permet de générer ensuite le rapport cyclique requis pour que le convertisseur DC/DC fonctionne dans la région MPP [34, 36].

➤ Méthode basée sur la logique floue

La logique floue est une borne de l'intelligence artificielle tout comme les réseaux de neurones et les algorithmes génétiques. Aujourd'hui, la logique floue est une approche alternative intéressante. Il présente plusieurs avantages comme un raisonnement proche de celui de l'homme, il se caractérise par sa robustesse et son insensibilité à la variation des différents paramètres. Au cours de cette dernière décennie, un nombre important de travaux et d'articles scientifiques ont été associés à la commande floue afin d'augmenter le rendement des panneaux photovoltaïques, ainsi que des études comparatives avec les techniques classiques (P&O, Incrémentation de la conductance, contre réaction de tension, ...) [25-28]

La mise en œuvre d'un contrôleur flou s'effectue en trois étapes, qui sont : la fuzzification, l'inférence et la défuzzification (Figure II.8).

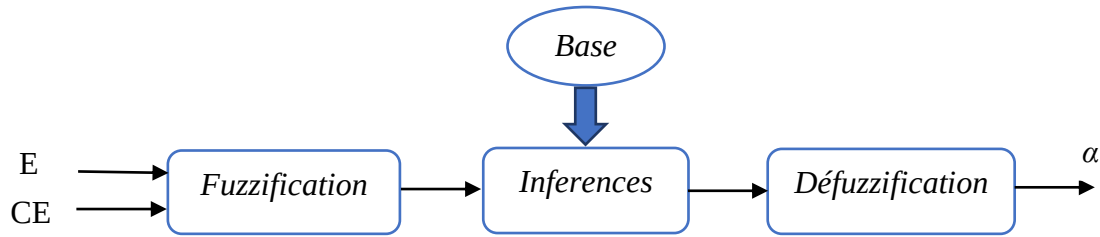


Figure II.8: Schéma fonctionnel de la commande floue

La fuzzification permet de brouiller les variables d'entrée, une étape préalable consiste à définir un intervalle de variation maximum autorisé pour les variables d'entrée. Le but de la fuzzification est de transformer des variables d'entrée en variables linguistiques ou variables floues. Dans notre cas, nous avons deux variables d'entrée qui sont l'erreur $E(k)$ et la variation d'erreur CE à l'instant k qui sont définies comme suit [26, 38] :

$$E(k) = \frac{P_{pv}(k) - P_{pv}(k-1)}{V_{pv}(k) - V_{pv}(k-1)} \quad (\text{II.3})$$

$$CE(k) = E(k) - E(k-1) \quad (\text{II.4})$$

Ainsi ses variables seront qualifiées : Négatif grand (NG), Négatif petit (NP), Zéro (Z), Positif petit (PP) et Positif grand (PG) comme la montre la figure (II.9).

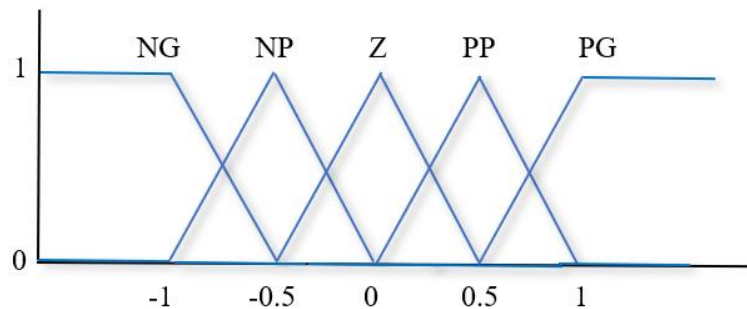


Figure II.9: Fonctions d'appartenance floue utilisées dans le processus de fuzzification

L'inférence est une étape de définition d'une relation logique entre les entrées et la sortie. En effet, des règles d'appartenance seront définies pour la sortie comme cela a été fait pour les entrées, grâce à ces règles une table d'inférence peut être établie (Tableau II.1) [28,42]. Il est évident qu'une bonne connaissance du système est requise pour le développement d'un tel régulateur. En effet, en règle générale, une valeur d'entrée est définie par deux fonctions floues de degrés différents, donc la sortie sera également définie par plusieurs fonctions, la question

étant de savoir à quels degrés d'appartenance. Plusieurs méthodes peuvent répondre à cette question. De notre côté, nous avons utilisé la méthode Max-Min. Enfin, nous devons faire l'opération inverse de la fuzzification, ici nous devons calculer une valeur numérique compréhensible par l'environnement extérieur à partir d'une définition floue et c'est le but de la défuzzification.

Tableau II.1: Base de règles de logique floue

E \ CE	NG	NP	Z	PP	PG
NG	PG	PG	PG	PG	PG
NP	PP	PP	PP	PP	PP
Z	PP	Z	Z	Z	PP
PP	NP	NP	NP	NP	NP
PG	NG	NG	NG	NG	NG

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné des définitions et notions de bases sur les convertisseurs DC/DC, ainsi que les modèles mathématiques nécessaires à l'étude de leurs comportements lors de la simulation du système PV global. Aussi, nous avons présenté quelques commandes MPPT pour rechercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale, sous différentes conditions de fonctionnement. Dans ce contexte plusieurs méthodes et algorithmes de poursuite ont été mis en application, chacun présente des avantages comme des inconvénients.

Dans le chapitre suivant, on va présenter la simulation de ces techniques MPPT sous MATLAB/Simulink en variant l'éclairement solaire puis on discutera les résultats obtenus.

Chapitre III

Simulation des commandes

MPPT sous différentes

conditions météorologiques

III.1. Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les différents résultats de simulation des commandes MPPT citées au chapitre précédent par l'environnement 'Simulink' de MATLAB. Le 'Simulink' nous permet d'établir les différentes commandes MPPT et de changer facilement les conditions atmosphériques (Eclairement, température), le système à simuler contient : le générateur photovoltaïque, les convertisseurs DC/DC, les commandes MPPT (P&O, P&O indirecte la logique floue) et la charge. Ensuite nous présentons les graphes obtenus par les différentes commandes et on discute les résultats.

III.2. Simulation du système photovoltaïque

La figure (III.1) montre le modèle proposé sous MATLAB/Simulink du système PV complet qui contient le générateur PV, le convertisseur DC/DC, les différentes techniques MPPT mentionnées ci-dessus et la charge. Les algorithmes MPPT sont appliqués pour fournir le rapport cyclique optimal afin de générer le signal MLI au convertisseur DC/DC, ce qui permet d'atteindre la puissance maximale du système PV pour différentes valeurs d'éclairement ou de température [45].

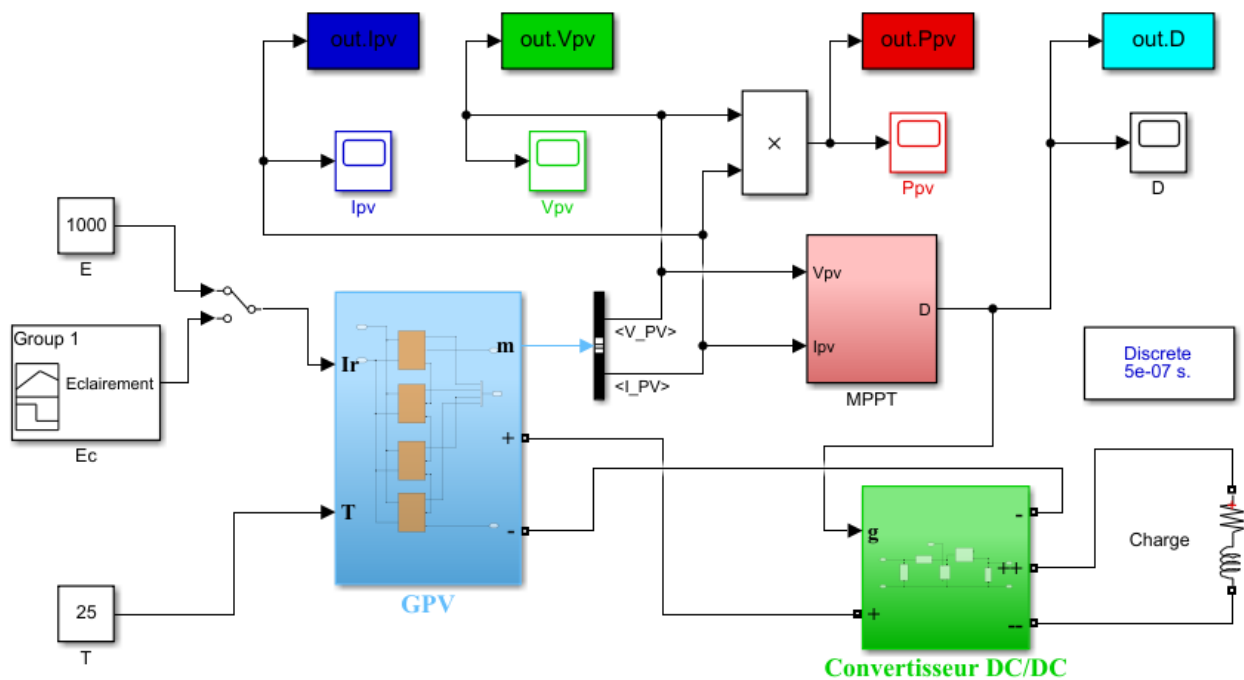


Figure III.1 : Modèle du système PV sous Simulink

Les modèles de simulation des blocs : générateur photovoltaïque, convertisseur DC/DC (Boost) et commandes MPPT sont illustrés sur les figures (III.2), (III.3) et (III.4) respectivement.

Nous changeons la technique MPPT à chaque fois et on verra la courbe de puissance générée par notre système.

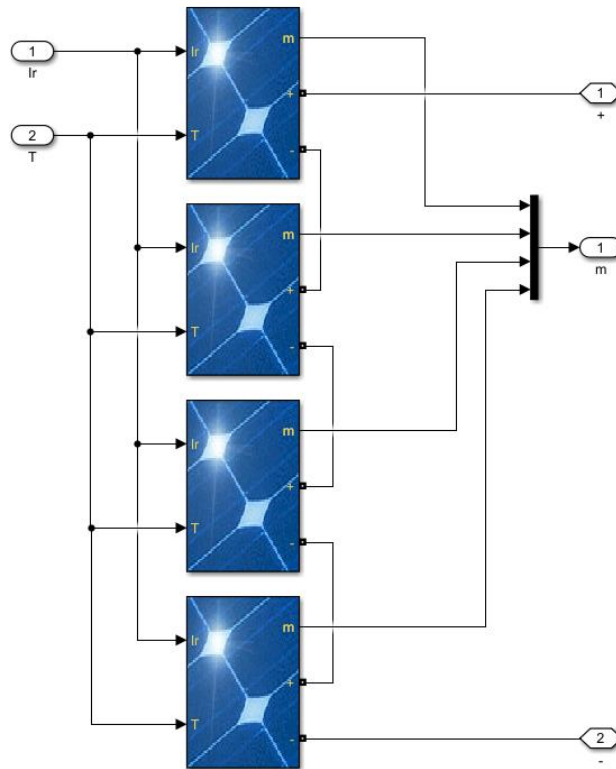


Figure III.2 : Modèle du générateur PV sous Simulink

Le générateur photovoltaïque utilisé est composé de quatre panneaux photovoltaïques connectés en série de type 'MSX60'. Ce panneau PV polycristallin génère environ de 60 W sous les conditions STC. Les paramètres de ce panneau sont donnés par le tableau ci-dessous :

Tableau III.1: Caractéristiques du panneau PV 'MSX60'

Paramètre	Valeur
Puissance maximale (P_{max})	58 - 60 W
Tension au MPP (V_{max})	17.1 V
Courant au MPP (I_{max})	3.5 A
Tension du circuit ouvert (V_{co})	21.1 V
Courant de court-circuit (I_{cc})	3.8 A
Nombre de cellules en série (N_s)	36

Le convertisseur DC/DC utilisé est de type Boost, il est composé d'une inductance, d'une diode, d'un condensateur et d'un IGBT contrôlé par le générateur d'impulsions PWM :

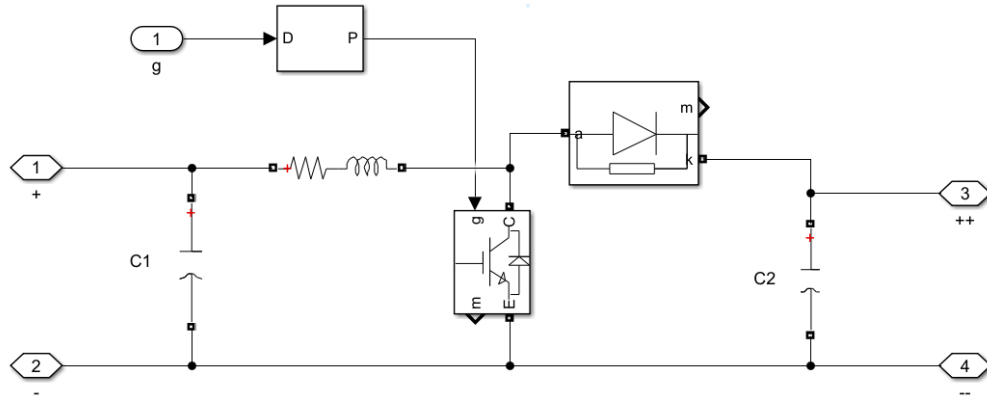


Figure III.3 : Modèle du convertisseur DC/DC sous Simulink

Les valeurs des capacités et de l'inductance sont données pour une ondulation de courant et de tension bien déterminé, nous fixons ces valeurs en se basant sur les références [32,36,43,44] :

$$L_{min} = \frac{\alpha(1 - \alpha)^2 R}{2f} \quad (III.1)$$

$$C_{min} = \frac{V_0 \alpha}{\Delta V_0 R f} \quad (III.2)$$

où

V_0 et ΔV_0 sont respectivement la tension de sortie et l'ondulation de la tension.

f est la fréquence de commutation.

Les commandes MPPT simulées sont citées dans le chapitre précédent : P&O, P&O avec régulateur PID et la commande basée sur la logique floue.

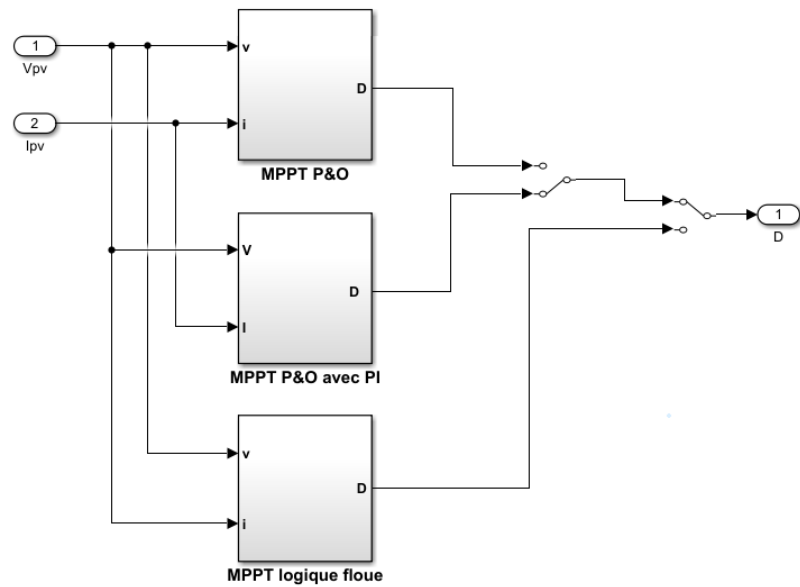


Figure III.4 : Choix de la commandes MPPT

III.3. Résultats obtenus et discussion

Les figures (III.5, III.6, III.7) montrent les courbes de la tension, du courant et de la puissance délivrée par le système PV dans des conditions stables : Eclairement de 1000 W/m^2 et Température de 25°C :

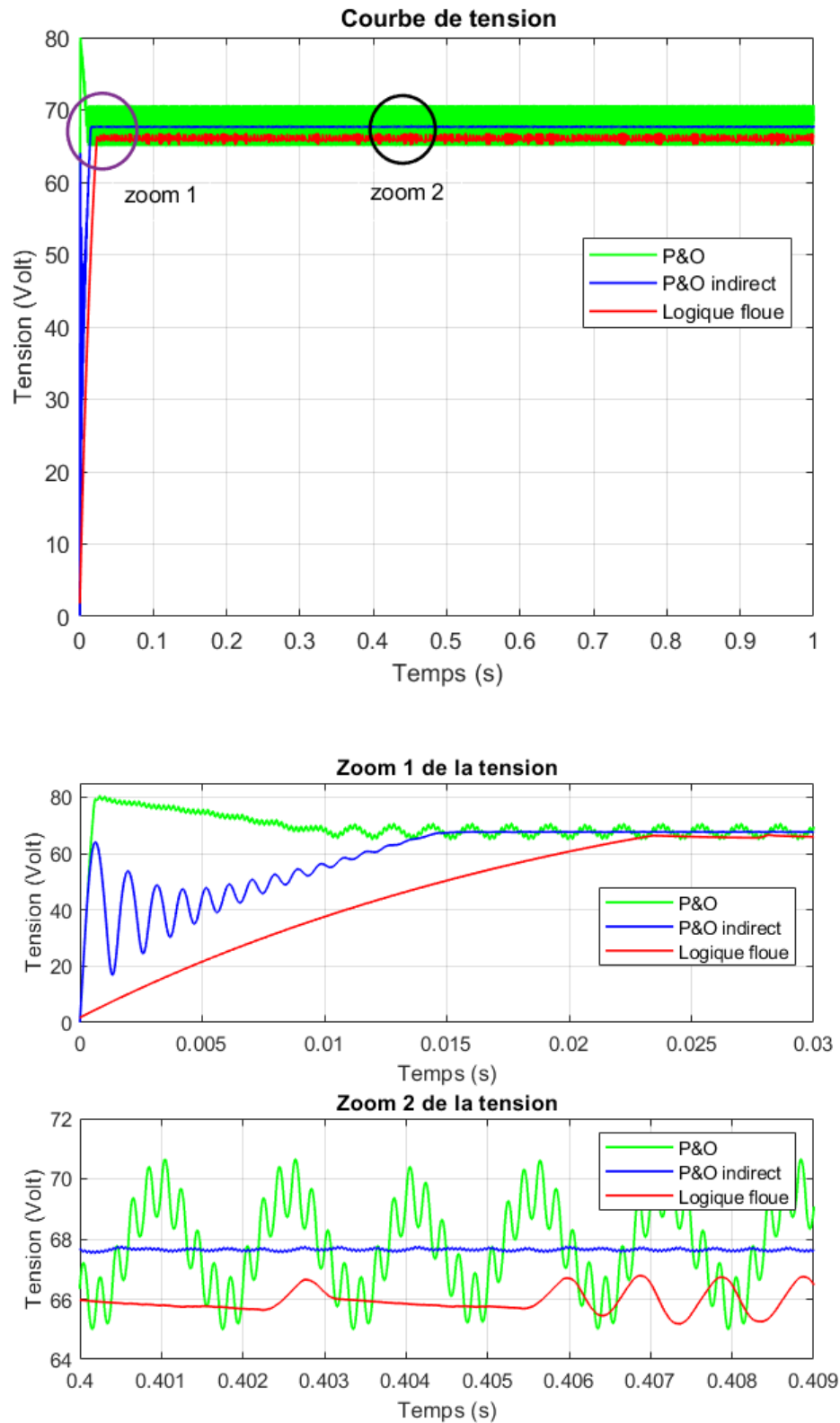


Figure III.5 : Courbes de tension pour différentes commandes MPPT sous éclaircment (1000W/m^2) et température ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$)

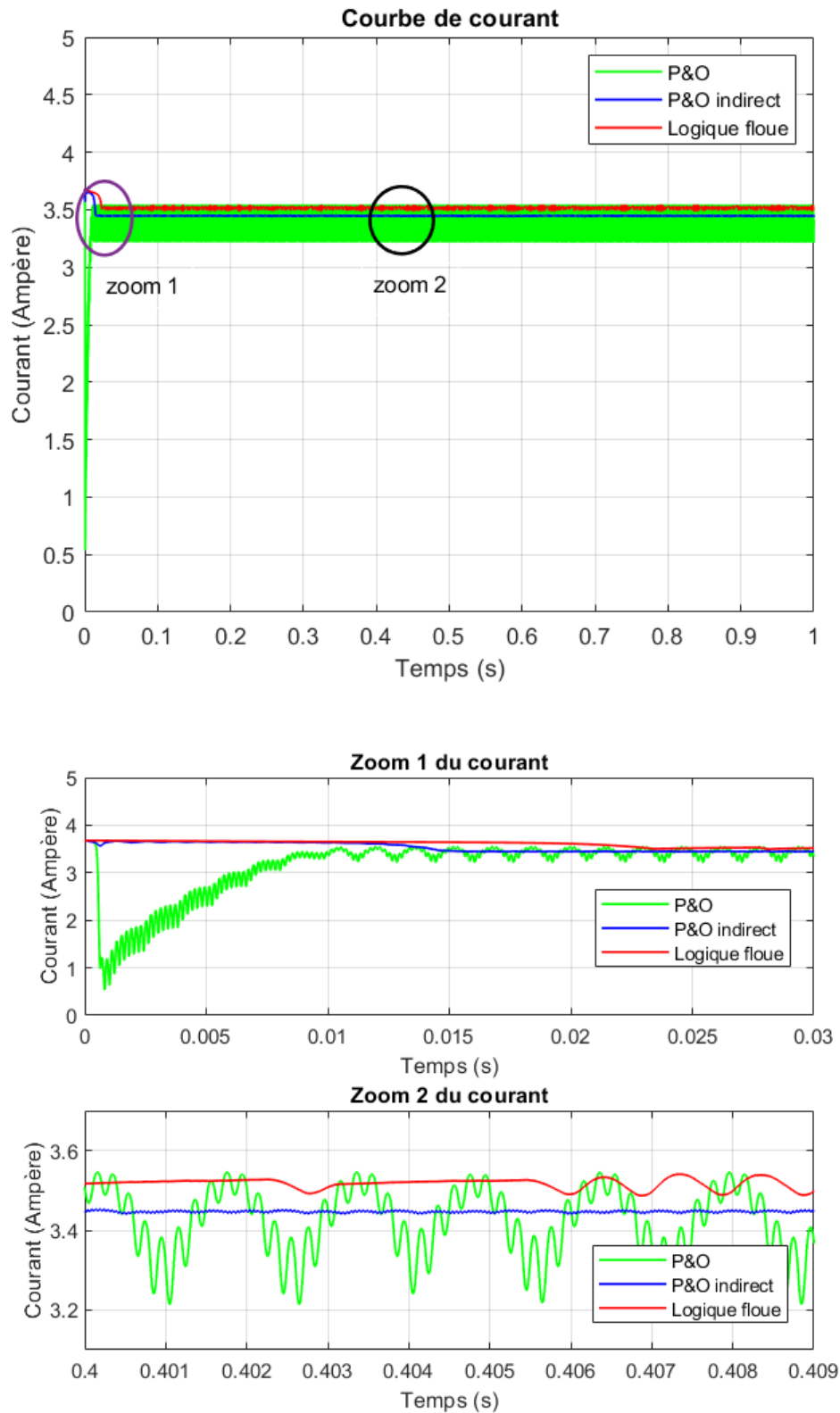


Figure III.6 : Courbes du courant pour différentes commandes MPPT sous éclaircissement (1000W/m^2) et température ($25\text{ }^\circ\text{C}$)

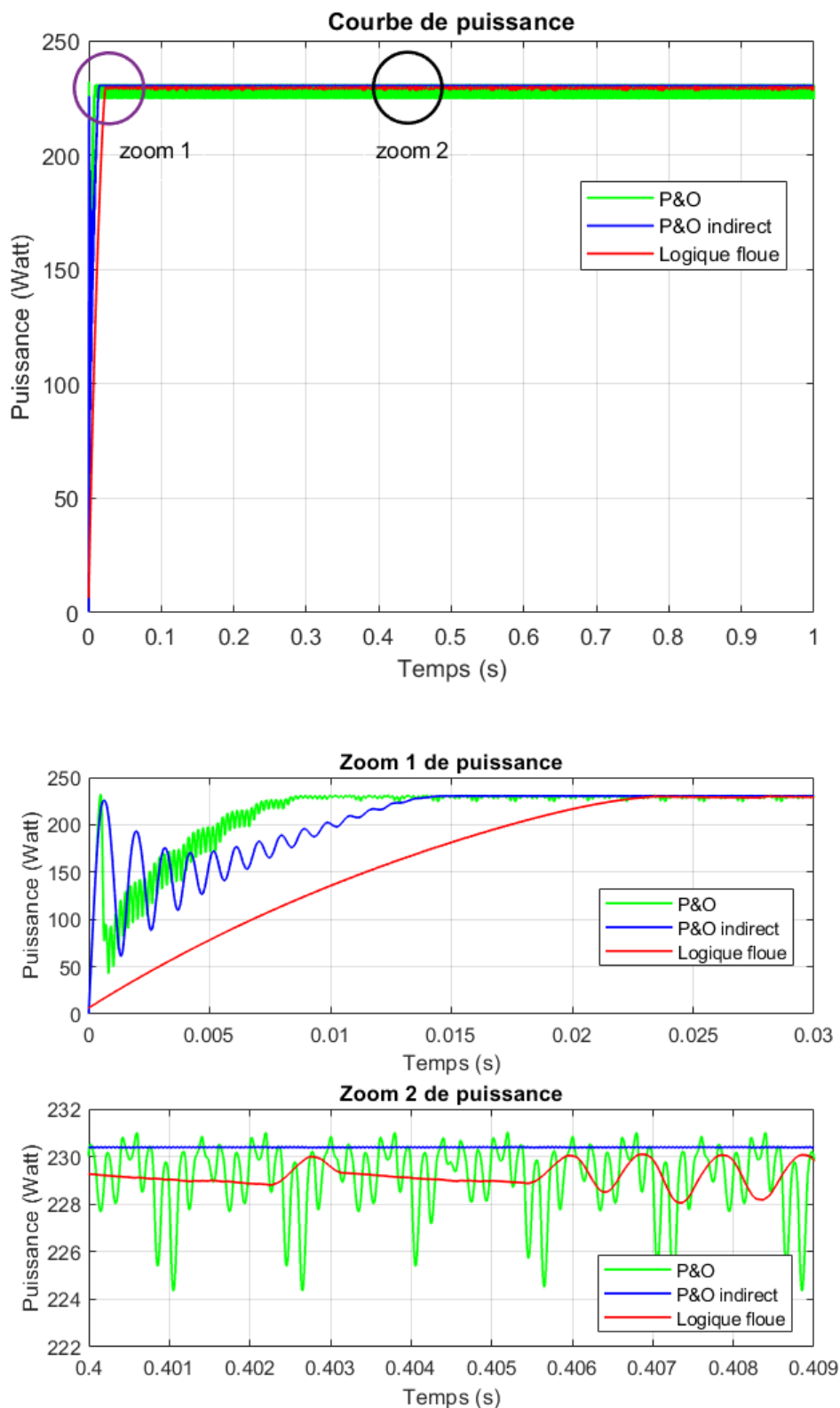


Figure III.7 : Courbes de puissance pour différentes commandes MPPT sous éclaircment (1000W/m^2) et température ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Les réponses temporelles de la tension, du courant et de puissance du système PV sont illustrées dans les figures (III.5, III.6, III.7). Dans les conditions uniformes, la puissance maximale délivrée par le GPV est d'environ 230 W correspondant à un courant de 3.5 A et une tension de 68 V. Les trois commandes MPPT convergent autour de ces valeurs de puissance, de courant et de tension mais avec précision différente. Nous pouvons constater que le temps de réponse de la commande P&O est rapide par rapport à ceux des autres commandes. Le temps de réponse de la technique P&O indirecte est un peu rapide et celui de la commande basée sur la logique floue est lent. Par contre la commande P&O présente une faible précision et très grandes oscillations autour de la valeur théorique. Le contrôleur flou a une précision meilleure que celle de la commande P&O. Les valeurs de puissance données par la commande P&O indirecte sont très proches de la valeur théorique avec une précision considérable. Par conséquent, nous pouvons dire que l'algorithme P&O indirect a une très bonne vitesse de suivi et une bonne précision particulièrement autour du point MPPT [45].

Ensuite, nous nous varions l'éclairement solaire en maintenant la température constante à 25 °C. Cette variation nous permet d'étudier la robustesse et l'efficacité de nos contrôleurs MPPT. L'éclairement énergétique est brusquement réduit de 600 W/m² à 400 W/m² avant d'augmenter rapidement à 800 W/m² et 1000 W/m² lors d'une perturbation d'une seconde, le profil de l'éclairement solaire est montré par la figure suivante :

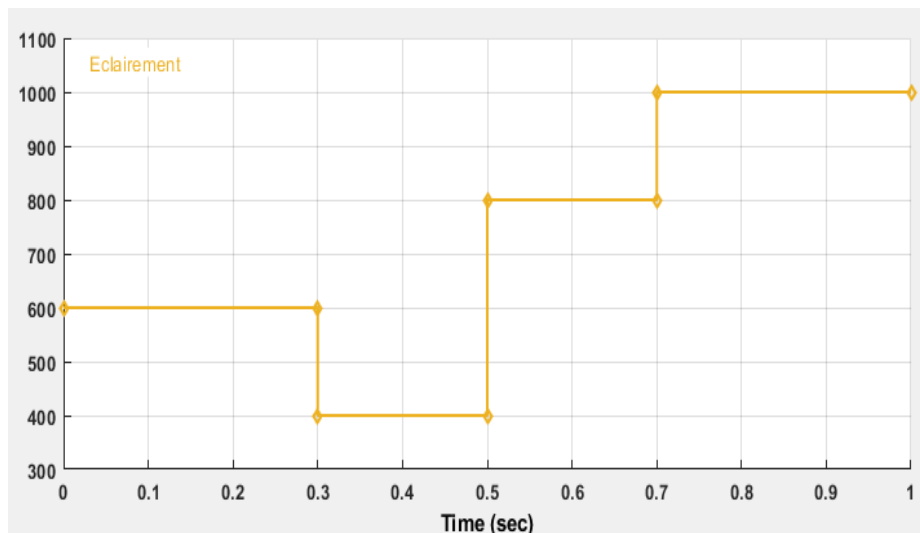
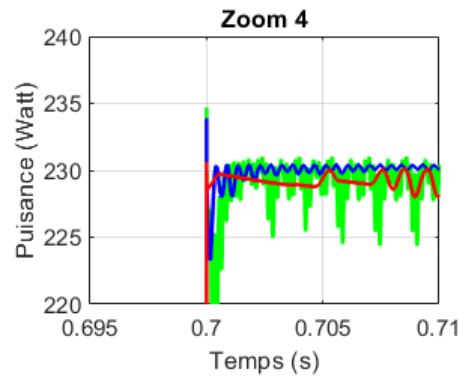
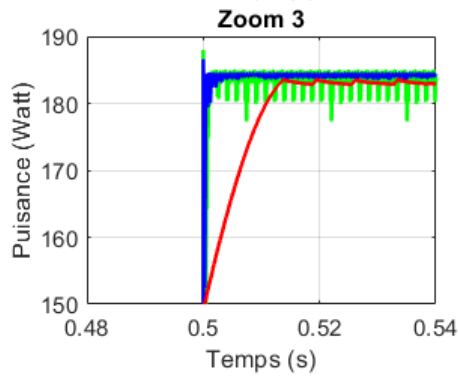
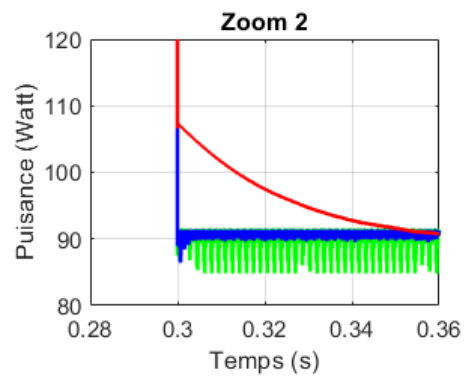
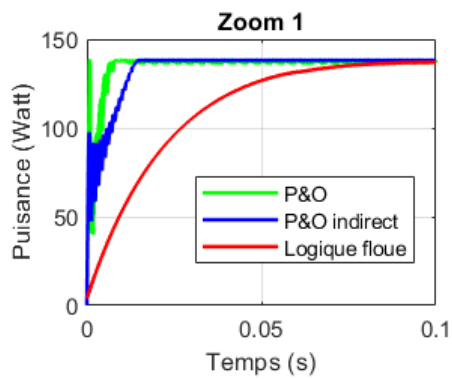
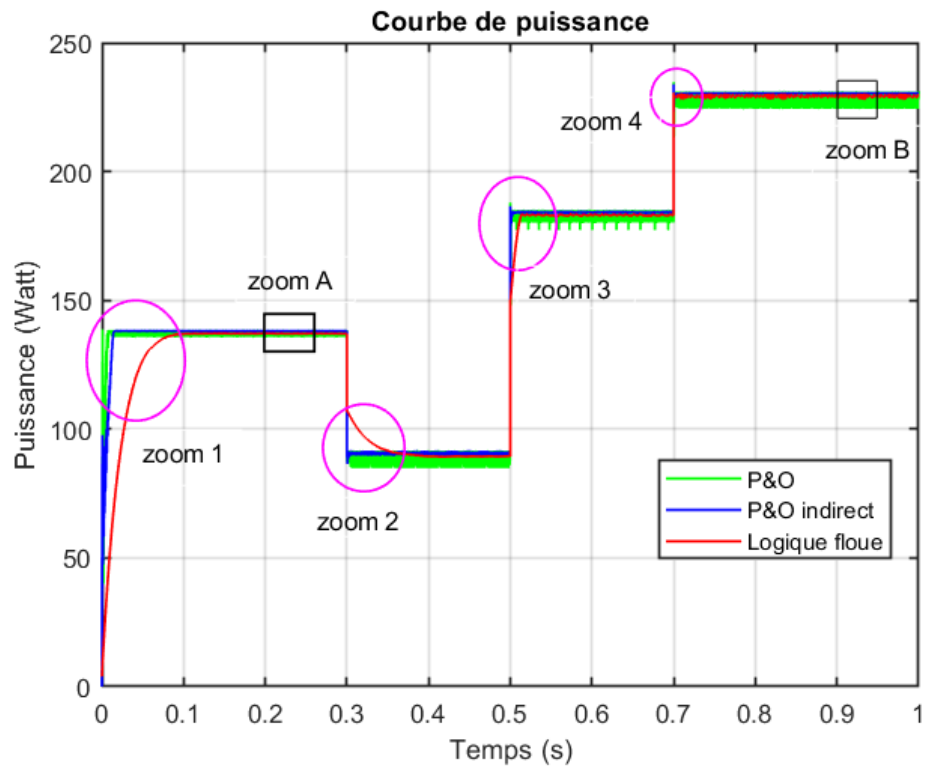


Figure III.8 : Profil de l'éclairement solaire

Les résultats de simulation de différentes techniques sous un éclairement variable sont présentés dans la figure (III.9) :



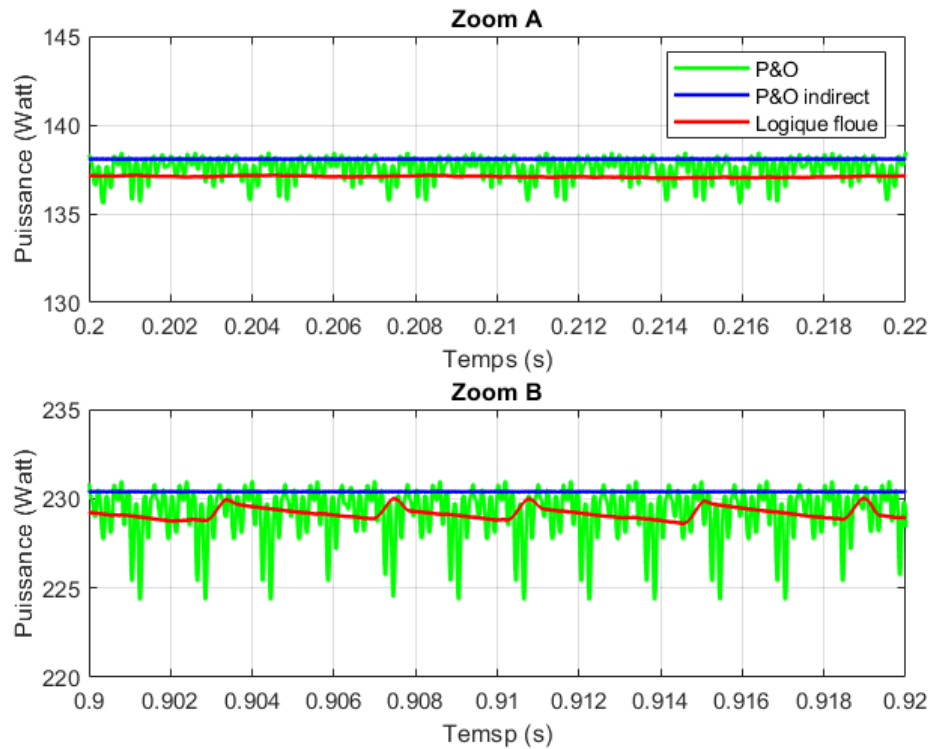


Figure III.9 : Courbes de puissance pour différentes commandes MPPT sous un éclairnement variable

Les zooms 1, 2, 3 et 4 sont pris lors d'un changement brusque d'éclairement solaire (régime transitoire), tandis que les zooms A et B sont pris en régime permanent.

On voit qu'il existe une relation de proportionnalité entre l'éclairement et la puissance. Une augmentation de l'éclairement se traduit par une augmentation de la puissance photovoltaïque générée. En mode transitoire, on remarque que le contrôleur à logique floue met plus de temps que les contrôleurs P&O et P&O indirect pour atteindre la puissance optimale ; c'est-à-dire un temps de réponse égal à 0,1s pour le contrôleur flou, 0,01s pour la commande P&O et 0,02s pour P&O indirect ; ce qui montre que les contrôleurs P&O et P&O indirect sont plus rapides que le contrôleur flou. En régime permanent et après stabilité, le contrôle P&O contient de très fortes oscillations, ce qui implique des pertes de puissance importantes. Par contre, l'oscillation est un peu faible pour le contrôleur flou et négligeable pour le contrôleur P&O indirect [45].

Tableau III.2: Comparaison entre les techniques MPPT [45]

MPPT	P&O	P&O indirect	Logique Floue
Identification des paramètres du GPV	Nécessaire	Nécessaire	Nécessaire
Complexité	Faible	Moyenne	Grande
Temps de réponse	Très rapide	Rapide	Lent
Précision	Acceptable	Très bonne	Bonne
Oscillations	Grande	Négligeable	Faible

A partir des résultats de simulation obtenus et des statistiques de comparaison présentées dans le tableau (III.2), nous remarquons que la commande P&O indirecte conduit à de meilleures performances, avec presque l'absence d'oscillations en régime permanent, et un temps de réponse rapide.

III.4. Conclusion

Les simulations effectuées par l'utilisation des techniques P&O, P&O indirecte et la logique floue, sous différentes conditions météorologiques ont permis de dire que les résultats obtenus par la commande P&O indirecte est meilleur que celle du contrôleur P&O et la logique floue, du point de vue robustesse et précision vis-à-vis des changements des paramètres météorologiques (éclairage solaire). La puissance de charge suit bien la puissance du GPV, quelques soient les variations d'éclairage solaire pour les trois contrôleurs. La méthode P&O, bien qu'elle soit efficace en termes de poursuite du PPM, présente des pertes de puissance dues à l'oscillation du point de fonctionnement du système autour de sa position optimale et un régime transitoire long. La poursuite du point maximum avec la commande floue a un taux d'ondulation minimale face aux différentes variations, les pertes de puissance sont moindres dans le régime transitoire ; ce qui implique une amélioration du rendement du système. On a conclu également que la commande P&O indirecte a une vitesse de suivre rapide à chaque phase de transition, en plus elle présente des très faibles oscillations autour de point de puissance maximale.

Chapitre IV

Etude et modélisation de l'électrolyseur et de la pile à combustible

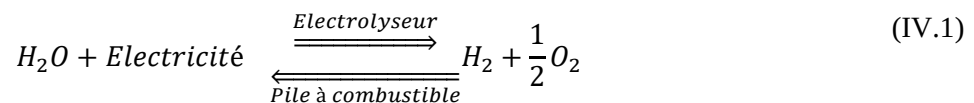
IV.1. Introduction

Depuis plusieurs années, l'hydrogène semble être le vecteur énergétique de l'avenir. Bien qu'il soit l'un des éléments les plus abondants de la planète, il n'existe pas de gisement, contrairement aux hydrocarbures, permettant d'extraire l'hydrogène directement. En effet, cet élément se trouve, dans la nature, presque systématiquement combiné avec d'autres atomes tels que l'oxygène dans le cas de l'eau ou le carbone dans le cas du gaz naturel. Pour le produire, il est donc nécessaire d'avoir une source d'hydrogène (gaz naturel, eau, ...). Aujourd'hui, une option future d'énergie basée sur la combinaison des énergies renouvelables comme source d'énergie, et l'hydrogène comme vecteur énergétique est en train de voir le jour.

Dans ce chapitre, nous présentons les connaissances nécessaires sur l'élément de production de l'Hydrogène (l'électrolyse de l'eau) et l'élément de stockage (pile à combustible), ses principes de fonctionnement ainsi que leurs caractéristiques de puissance. On s'intéresse aussi à la modélisation statique de l'électrolyseur et de la pile de type PEM. Ce type retient notre attention pour trois raisons essentielles : Sa température de fonctionnement relativement basse, sa technologie tout solide et enfin sa puissance variable entre les basses et les hautes puissances. C'est pour toutes ces raisons que nous avons choisi d'étudier un électrolyseur et une pile de type PEM.

IV.2. L'hydrogène comme vecteur énergétique intermédiaire

L'hydrogène est une source énergétique idéal pour remplacer à long terme les énergies fossiles, d'autant qu'il est l'élément le plus abondant de notre univers et qu'il est non-toxique car sa combustion ne rejette que de l'eau. Aujourd'hui, une option future d'énergie basée sur la combinaison des énergies renouvelables comme source d'énergie, et l'hydrogène comme vecteur énergétique est en train de voir le jour, l'hydrogène peut être produit par une source photovoltaïque à travers un électrolyse de l'eau, comme il se peut utiliser encore une fois pour la production de l'électricité à travers une pile à combustible.



IV.3. Fondamentale de l'électrolyse de l'eau

IV.3.1. Définition

Un électrolyseur est un dispositif qui utilise l'énergie électrique pour faire des réactions chimiques afin de produire de l'hydrogène. Il consiste à séparer l'eau (H_2O) en hydrogène (H_2) et oxygène (O_2) lors d'une réaction d'oxydoréduction. Le procédé industriellement disponible à l'heure actuelle consiste à réaliser cette électrolyse à l'aide d'électricité. Au regard du coût de la production par électrolyse d'eau, seul 4% de l'hydrogène est actuellement produit par électrolyse dans les cas où l'électricité est bon marché ou lorsqu'une haute pureté d'hydrogène est nécessaire.

IV.3.2. Technologies des électrolyseurs d'eau

Il existe actuellement trois types d'électrolyseur d'eau classés selon la nature de leur électrolyte dont résulte leur température de fonctionnement [46] :

Les électrolyseurs Alcalins, commercialisés et représentant la quasi-totalité des ventes d'électrolyseurs. Ces types d'électrolyse sont réalisés à partir d'une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium (KOH) dont la concentration varie en fonction de la température de fonctionnement.

Les électrolyseurs SOE (Solid Oxide Electrolyser), à oxyde solide, un électrolyte en céramique, conducteur à haute température sont encore au stade de la recherche. Cette technologie est directement issue des développements de piles à combustible de type SOFC, fonctionnant entre 600 et 1100°C et cette électrolyse à haute température (EHT) est un des procédés de production d'hydrogène à grande échelle les plus prometteurs pour le futur.

Les électrolyseurs PEM, à membrane échangeuse de protons, sont encore cours de développement mais proches de la commercialisation. Cette technologie se distingue par un électrolyte solide à membrane polymère conductrice de protons PEM à basse température.

Les tableaux (IV.1) et (IV.2) montrent les différents types d'électrolyseurs et leurs données techniques [46] :

Tableau IV.1: Différents types de technologies d'électrolyseur

Type	Electrolyte	Electrode	Réaction totale
PEM	Proton exchange membrane (Nafion)	Anode : graphite PTEE+Ti/RuO ₂ ,IrO ₂ Cathode:graphite+Pt/pt	Anode : $H_2O \rightarrow 2H^+ + \frac{1}{2}O_2 + 2e^-$ Cathode : $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$
KOH Alcalin	KOH/NIO, IMET (Inorganic MembraneElectrolysis)	Anode:Ni,Fer/Nialloys, metaloxides Cathode : steel + Ni/ Ni-Co	Anode : $4HO^- \rightarrow 2H_2O + O_2 + 4e^-$ Cathode : $4H_2O + 4e^- \rightarrow 2H_2 + 4HO^- + 4e^-$
SO Haute température	a) Zirconiaceramics. b) Zirconia oxide cermaics	Anode : ceramics Cathode :ZrNi cermets/CeOx	a) Anode : $2O_2^- \rightarrow O_2 + 4e^-$ Cathode : $2H_2O + 4e^- \rightarrow 2O_2^- + 2H_2$ b)Anode : $2H_2O \rightarrow 4H^+ + O_2 + 4e^-$ Cathode : $4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2$

Tableau IV.2: Données techniques des électrolyseurs

Type	Température de fonctionnement °C	Pression de fonctionnement bar	Consommation électrique KWh/Nm ³ de H ₂	Rendement énergétique %	Etat du marché
PEM	80 - 100	1 - 70	6	80 - 90	Développement
KOH Alcalin	50 - 100	3 - 30	4- 5	75 - 90	Commercialisé
SO H.T	800 - 1000	-	3 – 3.5	80 - 90	Recherche

IV.3.3. Principe de l'électrolyseur de type PEM

L'électrolyseur que nous étudions est de type PEM (Proton Exchange Membrane), elle est formée de deux électrodes, une cathode et une anode, d'un électrolyte solide à membrane polymère échangeuse de protons. L'électrolyseur met en œuvre la décomposition l'eau à partir

d'énergie électrique pour produire de l'hydrogène et de l'oxygène, elle est rendue possible par le passage d'un courant continu à travers deux électrodes immergées dans un électrolyte liquide ou solide [46-48].

L'électrolyse de l'eau consiste en deux réactions chimiques ayant lieu séparément sur deux électrodes. A l'anode se produit la réduction de l'eau suivant l'équation (V.2) et à la cathode l'oxydation des ions hydroxydes selon l'équation (V.3) :



Les électrons (e^-) intervenant dans les réactions sont apportés par le circuit électrique. Le schéma classique d'une cellule d'électrolyse est représenté par la figure (IV.1).

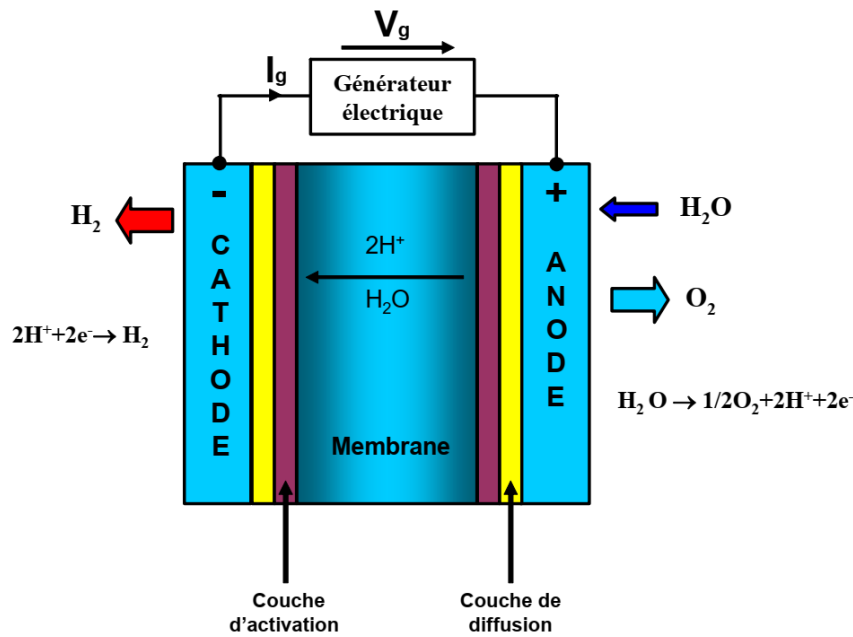


Figure IV.1 : Cellule d'électrolyseur de type PEM [46]

IV.3.4. Modélisation de l'électrolyseur et ses caractéristiques électriques

Un électrolyseur fonctionne en mode statique ou en mode dynamique. Le régime statique correspond à une demande de puissance constante aux bornes de l'électrolyseur avec des paramètres de fonctionnement fixes (température, humidité et pression). En mode statique, la tension pratique d'une cellule d'électrolyseur PEM est calculée de la manière suivante [48-51] :

$$V_{ele} = E_{rev} + V_{act} + V_{con} + V_{ohm} \quad (IV.4)$$

Où :

V_{ele} : est la tension d'une cellule élémentaire de l'électrolyseur.

E_{rev} : est la tension réversible dépend en pratique des pressions et de la température de fonctionnement, il s'agit de la loi de Nernst :

$$E_{rev} = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{0.5}}{a_{H_2O}} \right) \quad (IV.5)$$

Où :

E_0 : est la tension standard ou tension à vide calculée à partir de l'enthalpie libre définie pour 25°C et à 1 bar (eau formée à l'état liquide), $E_0 = -\frac{\Delta G}{nF} = \frac{237,34 \text{ J/mol}}{2 \cdot 96485 \text{ As/mol}} \approx 1.23 \text{ V}$.

V_{act} : représente la surtension d'activation due à la vitesse de la réaction électrochimique.

V_{con} : représente la surtension de concentration due au phénomène de transport.

V_{ohm} : représente la surtension ohmique dues aux résistances électriques des composants de la cellule face à la circulation des protons dans l'électrolyte et des électrons dans les électrodes.

$$V_{act} = \frac{RT}{2\beta F} \ln \left(\frac{j}{j_0} \right) \quad (IV.6)$$

$$V_{con} = \frac{RT}{2\beta F} \ln \left(1 - \frac{j}{j_l} \right) \quad (IV.7)$$

$$V_{ohm} = i \cdot R_{ohm} \quad (IV.8)$$

avec

T : Température de fonctionnement du composant (K).

R : Constante des gaz parfaits (8,314 J/K/mol).

$n = 2$: correspond à la quantité d'électrons échangée lors de la réaction.

F : Constante de Faraday (96485 C/mol).

P_{H_2} et P_{O_2} : sont respectivement les pressions relatives (bars) des gaz hydrogène et oxygène.

a_{H_2O} : est l'activité de l'eau. Nous considérons que l'eau consommée est sous forme liquide, dans ce cas $a_{H_2O} = 1$. Dans un cas contraire, il faut considérer P_{H_2O} .

β : est le coefficient de transfert de la réaction relative à un courant négatif reçu par l'électrolyseur ($0 < \beta < 1$).

R_{ohm} : résistance électronique et ionique de l'ensemble électrodes-membranes-électrolyte (Ω).

j_l : densité de courant limite (A/cm^2).

j : densité de courant dans la cellule (A/cm^2).

i : courant traversant la cellule (A).

La figure (IV.2.a) montre la variation des différentes surtensions en fonction de la densité de courant et la figure (IV.2.b) représente la caractéristique électrique totale tension-densité de courant d'une cellule d'électrolyseur de technologie PEM. La tension à vide est d'environ 1.23V. Lorsque l'intensité augmente, les surtensions augmentent et par conséquent la tension augmente, la tension d'une cellule est généralement limitée à 2.2V.

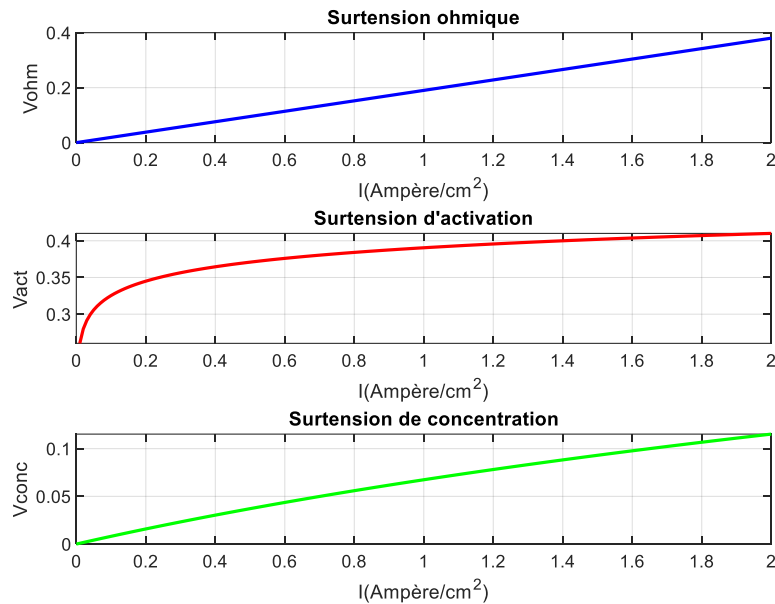


Figure IV.2.a : Variation des surtensions en fonction de la densité de courant

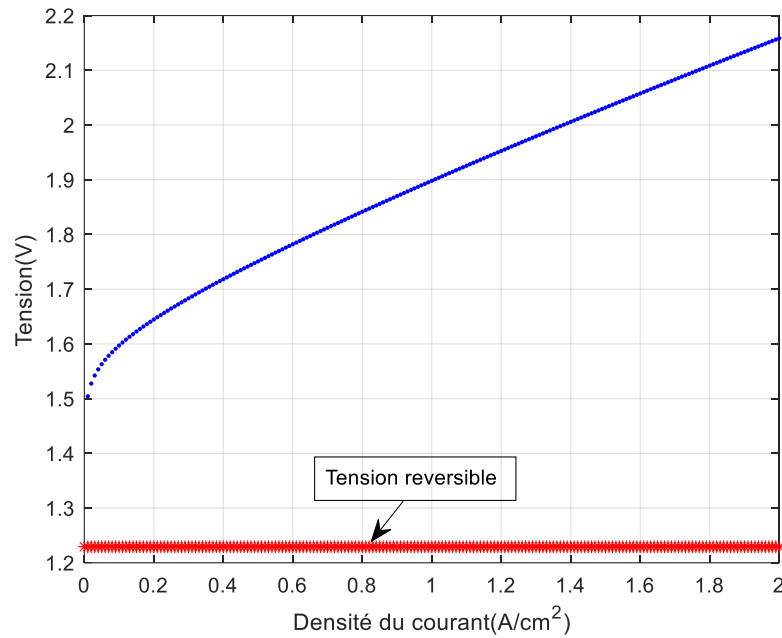


Figure IV.2.b : Caractéristique tension-densité de courant d'un électrolyseur

IV.3.5. Effet de la température sur la tension d'électrolyseur

Les graphes de la figure (IV.3) montrent que l'ensemble des irréversibilités présentes dans une cellule d'électrolyse diminue lorsque la température de fonctionnement de l'électrolyseur augmente. La résistance ionique, qui est prépondérante, diminue alors, permettant de diminuer la tension pratique de l'électrolyseur et donc sa consommation énergétique.

La simulation de la caractéristique $V = f(I)$ montre qu'avec une augmentation de la température des cellules de 25°C à 75 °C, la tension a diminué, passant de 2,12 V à 2,04 V pour une densité de courant de 1,8 A/cm². Alors, il est assuré que le fonctionnement à haute température est moins avantageux pour l'électrolyse de l'eau.

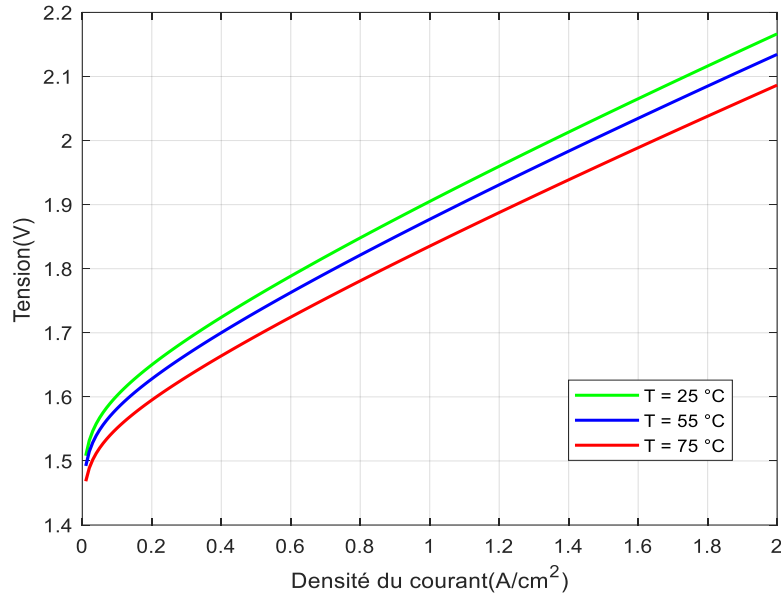


Figure IV.3 : Effet de la température sur la caractéristique électrique d'un électrolyseur

IV.3.6. Débit d'hydrogène et rendement de l'électrolyseur

Selon la loi de Faraday, le taux de production d'hydrogène d'une cellule d'électrolyseur est directement proportionnel au courant électrique [52-54] :

$$n_{H2} = \frac{\eta_F \cdot N_c \cdot i_e}{2F} \quad (IV.9)$$

Ou :

i_e : Courant de l'électrolyseur (A).

n_{H2} : Débit ou taux d'hydrogène produit (mol/s).

N_c : Nombre de cellules.

F : Constante de Faraday (96485 C/mol).

η_F : Rendement ou efficacité faradique.

Le taux de production d'hydrogène par l'électrolyseur entre la quantité réel et théorique de la production d'hydrogène est connu comme l'efficacité de Faraday. En supposant que la température de fonctionnement de l'électrolyseur est 40 °C, l'efficacité de Faraday est exprimée par [52-54] :

$$\eta_F = 96.5 \exp\left(\frac{0.09}{i_e} - \frac{75.5}{i_e^2}\right) \quad (IV.10)$$

IV.4. Présentation de la pile à combustible (PAC)

IV.4.1. Définition et principe de fonctionnement

Une pile à combustible est un dispositif électrochimique qui convertit directement l'énergie chimique d'une réaction en énergie électrique tout en dégageant de la chaleur et de l'eau [54]. Le principe de fonctionnement de la pile est basé sur l'électrolyse inverse qui met en évidence la possibilité de produire de l'électricité et de la chaleur à partir de la réaction chimique entre le combustible et le comburant. Le principe de fonctionnement est illustré dans la figure (IV.4).

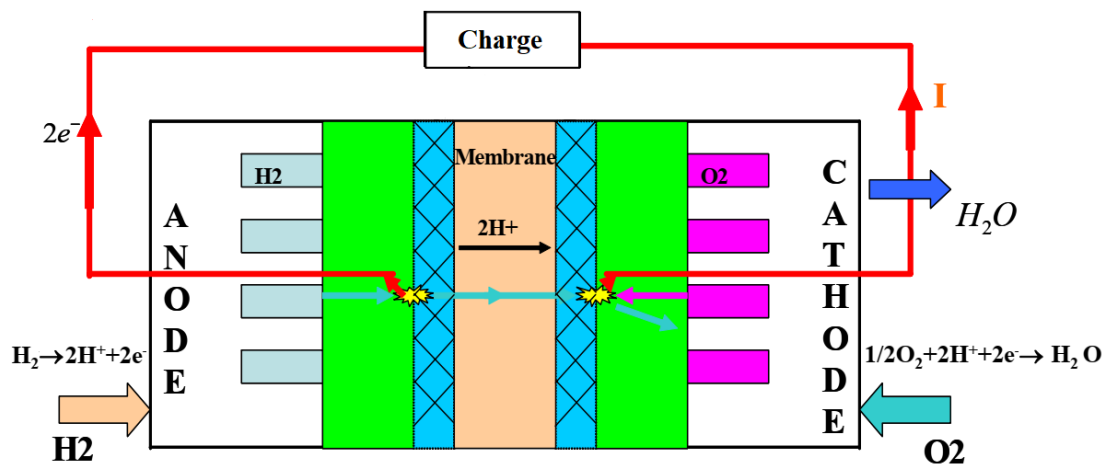


Figure IV.4 : Pile à combustible de type PEM [46]

La pile à combustible PEM met en jeu la réaction d'oxydoréduction entre l'hydrogène et l'oxygène pour produire de l'eau, de l'électricité et de la chaleur. La figure (IV.4) représente une cellule de pile PEM constituée de deux électrodes (anode et cathode) séparées par l'électrolyte, isolant électronique et conducteur ionique, une membrane polymère en Nafion ou Gore d'une épaisseur typique d'une centaine de micromètres. Les réactions électrochimiques se produisent à l'interface électrolyte électrode où se situent une couche de diffusion des gaz et une couche d'activation contenant le catalyseur (souvent du platine) nécessaire à l'activation de la réaction [46].

L'hydrogène H_2 alimente le côté anode (électrode négative) : ses atomes sont dissociés en électrons et en protons. Les protons traversent la membrane, tandis que les électrons circulent de l'anode vers la cathode (électrode positive) par les électrodes et le circuit électrique extérieur dans lequel une partie de leur énergie potentielle est convertie en travail utile. L'oxygène O_2 (pur ou de l'air) alimente le côté cathode et se combine aux protons qui ont traversé la membrane et

aux électrons venant du circuit électrique pour donner de l'eau. Cette eau issue de la réaction électrochimique doit être évacuée, souvent par un débit d'air en excès [46].

La pile à combustible constitue donc un dispositif de transformation de matière et de conversion d'énergie fortement hétérogène. Le résultat net des réactions simultanées au sein de ce dispositif de conversion électrochimique est une production d'eau accompagnée de production d'électricité à courant continu et de chaleur suivant les réactions [46,48,56,57] :

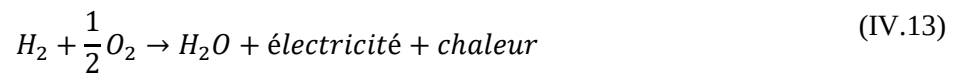
- À la cathode (électrode positive), réduction de l'oxygène :



- À l'anode (électrode négative), oxydation de l'hydrogène :



- La réaction d'oxydoréduction totale s'écrit :



Cette équation résume le principe de fonctionnement de la pile à combustible, où l'énergie chimique (fournie par les débits d'hydrogène et d'oxygène) est transformée en énergie électrique (circulation des électrons entre anode et cathode) tout en produisant de l'eau et de la chaleur.

IV.4.2. Différents types des piles à combustible

Les piles à combustible sont généralement six types classifiés selon la nature d'électrolyte utilisé et leur température de fonctionnement, on distingue alors les piles à basse température (<250°C) et les piles à haute température (600-1000°C). Ces types sont [58-61] :

- Les piles Alcalins AFC (Alkaline Fuel Cell),
- Les Pile à acide phosphorique PAFC, (Phosphoric Acid Fuel Cell)
- Les Piles PEMFC à membrane échangeuse de protons (Proton Exchange Membrane Fuel Cell),
- Les Piles SOFC (Solid Oxide Fuel Cell),
- Les Piles MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell),
- Les Piles DMFC (Direct Methanol Fuel Cell).

Tableau IV.3: Différents types des Piles et leurs caractéristiques techniques [58-61]

Type	Electrolyte	Combustible & Oxydant	Puissance & Rendement	Température et pression de fonctionnement	Applications et état du marché
AFC	Postasse KOH	Hydrogène Oxygène	1W-100KW 55 - 60 %	50 – 200 °C 1 – 5 bars	Spatial, défense, équipements portables (Commercialisée)
PAFC	Acide phosphorique liquide	Hydrogène Gaz naturel (reformage) Air	200KW-100MW 35 - 45%	150 – 220 °C 1 bar	Stationnaire, cogénération, transport (Commercialisée)
PEMFC	Membrane à échange de proton	Hydrogène Air	1W-10MW 30 - 45%	60 – 120 °C 1 bar	Spatial, transport, stationnaire, équipement portable (Commercialisée, Développement et Recherche)
DMFC	Membrane à échange de proton	Méthanol Air	1W-~KW -	70 – 90 °C -	Transport, équipement portable (Commercialisée, Développement et Recherche)
MCFC	Sel de Carbonate fondu liquide	Hydrogène, Gaz naturel, Méthanol... Air	500KW-10MW 50 - 60%	600 – 800 °C 1 bar	Stationnaire, cogénération, transport, production décentralisée (Développement et Recherche)
SOFC	Céramique Solide	Hydrogène, Gaz naturel, Méthanol... Air	1KW-100MW 50 - 55%	700 – 1050 °C 1 bar	Stationnaire, cogénération (Développement et Recherche)

IV.4.3. Modélisation statique de la pile à combustible

Comme l'électrolyseur, la pile à combustible fonctionne en mode statique ou en mode dynamique. En mode statique, la tension d'une cellule de pile à combustible de type PEM peut être donnée par l'expression suivante [55,62,63] :

$$V_{pac} = E_{rev} - V_{act} - V_{con} - V_{ohm} \quad (IV.14)$$

où

V_{pac} : Tension de la pile à combustible.

E_{rev} : Tension réversible en fonction des pressions et de la température de fonctionnement, donnée par la loi de Nernst :

$$E_{rev} = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{0.5}}{a_{H_2O}} \right) \quad (IV.15)$$

E_0 : est la tension à vide, $E_0 \approx 1.23 \text{ V}$.

V_{act} : tension due aux pertes d'activation.

V_{con} : tension due aux pertes de concentration (ou de transport).

V_{ohm} : tension due aux pertes ohmiques.

$$V_{act} = \frac{RT}{2\beta F} \ln \left(\frac{j}{j_0} \right) \quad (IV.16)$$

$$V_{con} = \frac{RT}{2\beta F} \ln \left(1 - \frac{j}{j_l} \right) \quad (IV.17)$$

$$V_{ohm} = i \cdot R_{ohm} \quad (IV.18)$$

Les paramètres T , R , n , F , P_{H_2} , P_{O_2} , a_{H_2O} et β sont bien définies dans la partie précédente de l'électrolyseur.

IV.4.4. Caractéristiques électriques de la pile à combustible

La caractéristique électrique d'une pile à combustible est déterminée par la courbe de tension et de puissance totale en fonction du courant délivré (ou densité de courant). Les caractéristiques électriques d'une cellule de pile à combustible basse température sont décrites aux figures (IV.5.a), (IV.5.b) et (IV.6).

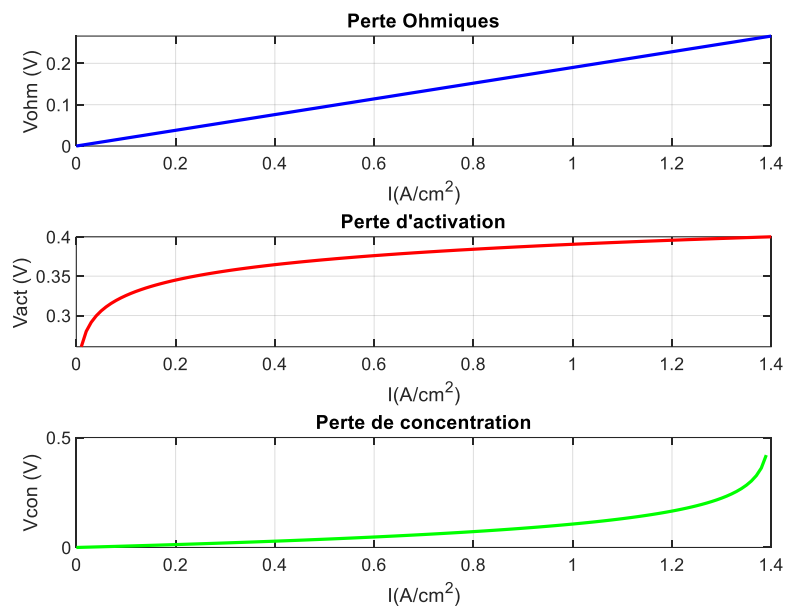


Figure IV.5.a : Variation des pertes en fonction de la densité de courant

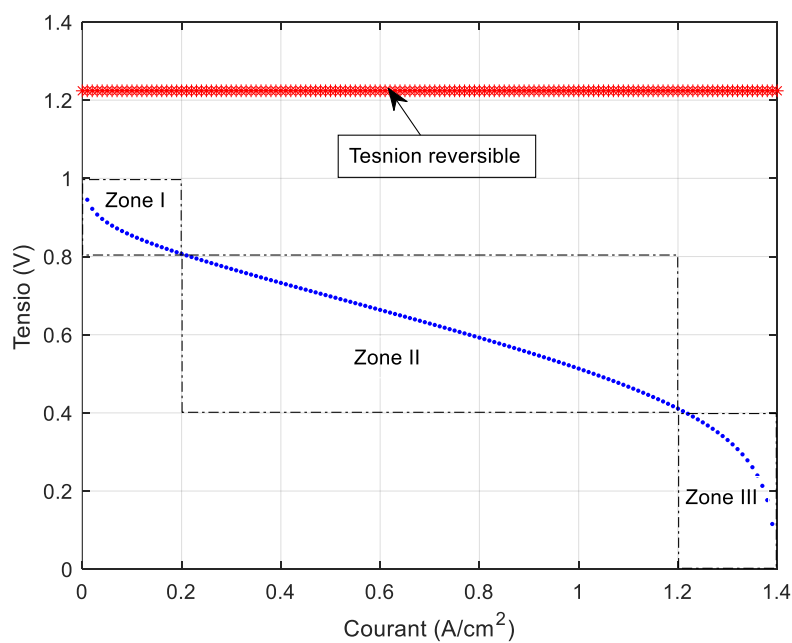


Figure IV.5.b : Caractéristique Tension-Densité de courant d'une cellule de pile à combustible

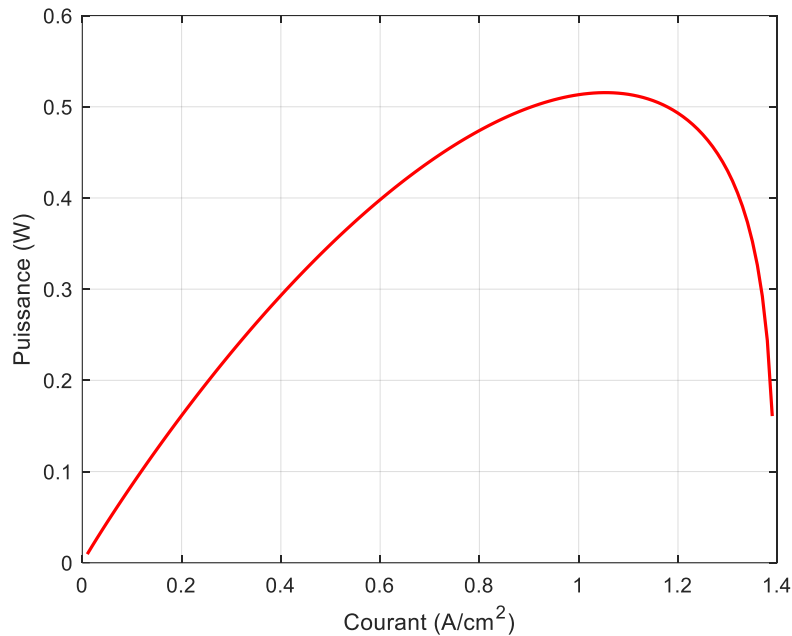


Figure IV.6 : Caractéristique Puissance-Densité de courant d'une cellule de pile à combustible

La Figure (IV.5.b) montre l'allure typique d'une courbe de polarisation statique de la pile à combustible PEM. La tension à vide (tension de Nernst) est d'environ 1,23V. Les différentes pertes (activations, ohmiques et concentration) sont présentes par la figure (IV.5.a) à toutes les valeurs de densité de courant avec des prépondérances diverses. Ces pertes électrochimiques permettent de découper la courbe de polarisation en trois zones principales [60,61] :

- La première zone représente la perte d'activation due à la vitesse de la réaction électrochimique. Cette perte est donnée par l'équation (IV.16).
- La deuxième zone est relative aux pertes ohmiques causées par les résistances électriques des composants de la cellule. Elles sont données par l'équation (IV.18).
- La troisième zone correspond à la perte de concentration résultante de la limitation de la diffusion des protons à travers la membrane. Cette perte est donnée par l'équation (IV.17).

La tension totale de sortie est égale au potentiel E_0 moins la somme des pertes électrochimiques. Lorsque la densité de courant augmente, les pertes sont plus importantes (pertes d'activation et ohmique) et par conséquent la tension diminue. Pour de fortes densités de courant, la tension chute rapidement (pertes de concentration).

La puissance est définie comme le produit entre le courant et la tension. Elle permet de décrire la courbe caractéristique puissance/densité de courant (par cellule) montrée par la Figure (IV.6).

Lorsque la densité de courant augmente aux intervalles des zones (I) et (II), la puissance augmente de façon logarithmique jusqu'à sa valeur maximale, pour de fortes densités de courant (zone (III)), la puissance diminue à cause de la chute importante de tension due aux pertes de concentration.

IV.4.5. Influence de la température et de la pression sur les caractéristiques de la pile à combustible

L'augmentation de la température influe positivement sur la tension de la pile, autrement dit si l'on augmente la température aux environs de 100°C, la tension d'une cellule augmente jusqu'à une valeur de 0.05 Volt par cellule environ, ce qui entraîne l'augmentation de la puissance fournie par la pile (Fig. IV.7). La température accélère d'une part, les réactions chimiques à l'intérieure de la pile et d'autre part, diminue les pertes d'activation et les pertes ohmique, par conséquent les pertes de concentration sont constantes [60]. Il faut signaler que pour les pertes ohmiques qui suivent une forme linéaire, la température agit directement sur la résistance spécifique de la membrane. Par contre, pour les pertes d'activation, en plus de la diminution de ces pertes, la température amortie sa non linéarité pour des valeurs élevées de densité de courant. La température de la pile doit rester limité ($< 100^{\circ}\text{C}$) pour qu'on puisse garder l'efficacité de la membrane et le fonctionnement normale des composants du cœur de la pile, donc on ne peut pas dépasser une certaine limite ($T_{\text{max}} = 100^{\circ}\text{C}$) qui est nécessaire à l'obtention d'une conductivité ionique suffisante de l'électrolyte et maintenir l'eau à l'état liquide dans la membrane.

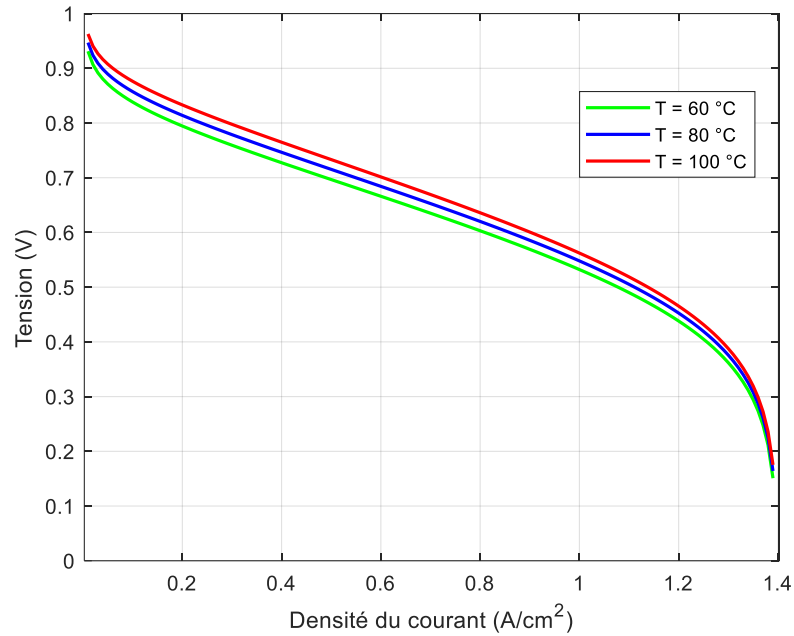


Figure IV.7.a : Effet de la température sur la caractéristique Tension-Densité de courant

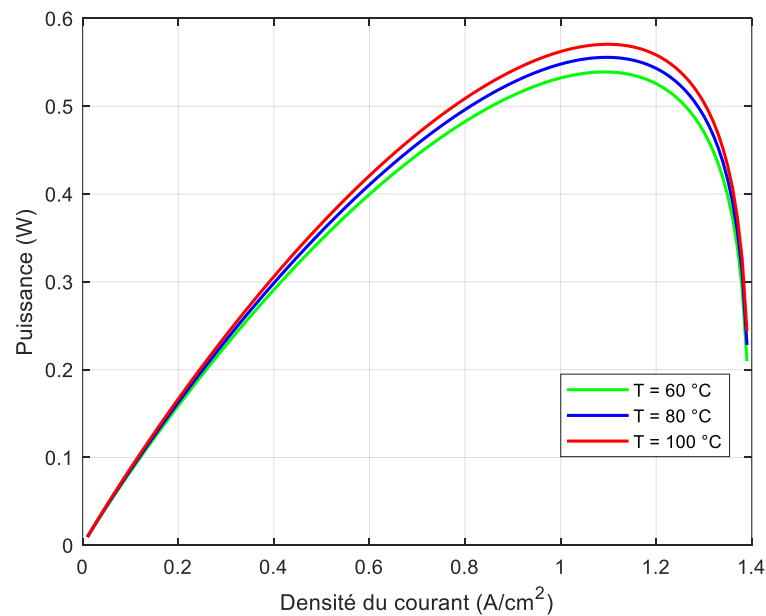


Figure IV.7.b : Effet de la température sur la caractéristique Puissance-Densité de courant

Pour voir l'effet de la pression sur la pile, on fixe la température à 60°C et on varie les pressions d'oxygène et d'hydrogène. L'augmentation des pressions provoque l'augmentation de la tension et la puissance aux bornes de la pile comme les montres les Figures (IV.8.a) et (IV.8.b). Les pertes ohmiques et de concentration restent invariables et linéaires ; cela veut dire que la variation de la pression n'a aucun effet sur ces paramètres. Tandis que les pertes d'activation

augmentent proportionnellement en fonction de cette pression mais d'une manière moins sévère que celle obtenue avec la variation de la température [60].

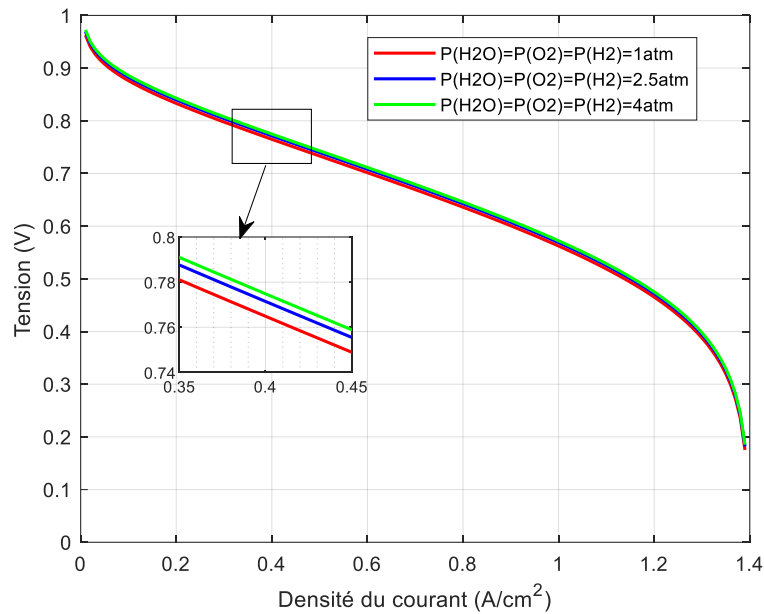


Figure IV.8.a : Effet de la pression sur la caractéristique Tension-Densité de courant d'une PAC

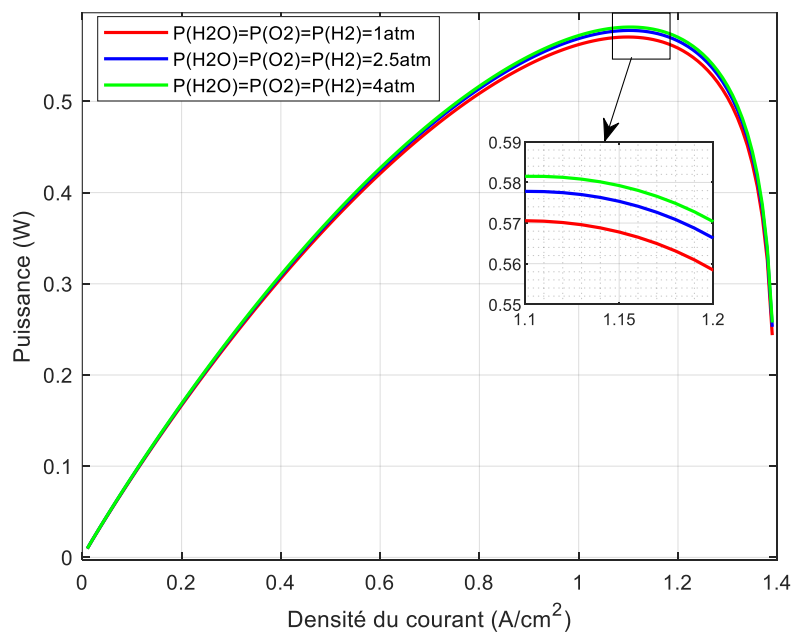


Figure IV.8.b : Effet de la pression sur la caractéristique Puissance-Densité de courant d'une PAC

IV.4.6. Rendement de la pile à combustible

Le rendement d'un processus de transformation d'énergie (ou de puissance) est défini comme :

$$\eta = \frac{\text{énergie (puissance) récupérée}}{\text{énergie (puissance) fournie}} \quad (\text{IV.19})$$

Le rendement de la pile à combustible est donc égal au rapport entre l'énergie électrique délivrée et l'énergie potentielle de l'hydrogène consommé pour produire cette électricité. Mais il n'est pas simple à définir. D'abord l'énergie potentielle de l'hydrogène n'est pas intrinsèque et il faut définir quelle énergie potentielle de l'hydrogène on considère, car celle-ci dépend des réactifs et des conditions de la réaction. On est ainsi conduit à distinguer différents rendements [46,55,64-66] :

$$\eta_{pac} = \eta_{mat} \cdot \eta_{th} \cdot \eta_{vol} \quad (\text{IV.20})$$

η_{mat} : est le rendement de matière, dans la notion de rendement global, intervient également le problème de la consommation des gaz. En effet, tout le gaz fourni n'est pas consommé pratiquement par la pile, et on définit un coefficient d'utilisation des gaz que l'on estime typiquement à 95%.

η_{th} : est le rendement thermodynamique, il s'agit d'un rapport entre le travail électrique récupérable et l'enthalpie de la réaction à l'équilibre thermodynamique (dans les conditions standards).

$$\eta_{th} = \frac{\Delta G^o}{\Delta H^o} \quad (\text{IV.21})$$

La réaction de formation de l'eau, lorsque celle-ci est produite à l'état liquide à 25 °C et à une pression de 1 bar, libère une variation d'enthalpie libre standard $\Delta G^o = -237 \text{ KJ/mol}$, et une variation d'enthalpie de $\Delta H^o = -285 \text{ KJ/mol}$. On trouve alors un rendement thermodynamique égal à 83%.

η_{vol} : est le rendement voltaïque, calculé par le rapport entre la tension réelle de la cellule et la tension standard (tension à vide $E_0 \approx 1.23 \text{ V}$) :

$$\eta_{vol} = \frac{V_{cellule}}{E_0} \quad (\text{IV.22})$$

En pratique, la tension typique d'utilisation d'une cellule de PEM se situe autour de 0,7V. On peut calculer un rendement voltaïque approximatif égal à 57%.

Pour les piles à combustible de type PEM, le rendement global est autour de 40%.

IV.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons explicité l'avenir de la filière d'hydrogène. On a présenté les différentes techniques de production d'hydrogène ainsi que leurs applications. En outre, nous avons mis l'accent sur le principe de fonctionnement d'électrolyseur et de la pile à combustible, deux éléments nécessaires pour notre système hybride étudié.

Dans le chapitre suivant, nous nous intéresserons à la simulation de notre système hybride : GPV/électrolyseur/pile à combustible pour un site isolé sous l'environnement Simulink de MATLAB et on discutera ainsi les résultats obtenus.

Chapitre V

Simulation du système hybride PV/Hydrogène et discussion des résultats

V.1. Introduction

Il existe de nombreux sites isolés dans le monde, alimentés par des panneaux photovoltaïques, l'électricité provenant de ces panneaux est intermittente, dépendante des conditions climatiques, donc ces générateurs PV sont souvent couplés à un système de stockage assurant une disponibilité en continue d'énergie. Il existe plusieurs systèmes de stockage tels que la pile à combustible (PAC) ou la batterie de secours afin d'assurer une continuité d'alimentation électrique (24 heures). Dans notre étude, nous choisissons un système hybride PV/Hydrogène, un électrolyseur prend l'excès d'électricité des panneaux PV pour produire de l'hydrogène qui est stocké dans un réservoir d'hydrogène pour une utilisation ultérieure dans la pile à combustible, ce qui générera le manque d'électricité nécessaire pour alimenter la charge lorsque le GPV ne peut pas répondre aux exigences de cette charge.

Dans ce chapitre, nous présentons le système étudié sous l'environnement Simulink/MATLAB. Le système est constitué d'un GPV muni d'une commande MPPT, d'une pile à combustible, d'un électrolyseur et d'un réservoir de stockage d'hydrogène. Le système hybride PV/Hydrogène étudié est conçu pour être totalement autonome pour générer, stocker et fournir de l'énergie électrique aux charges locales.

V.2. Description du système hybride PV/Hydrogène

La combinaison de l'ensemble des modèles des composants pour constituer un modèle dédié au système hybride PV/Hydrogène répondant à différentes demandes en énergie durant une journée typique est réalisée sous Matlab/Simulink. La figure (V.1) montre le système hybride PV/Hydrogène, il est composé d'un GPV, d'un électrolyseur, d'une unité de stockage de l'hydrogène et d'une pile à combustible. Dans le système étudié, le GPV alimente directement l'utilisateur. L'excédent solaire est stocké sous forme chimique. Car dans le cas où la puissance délivrée par le photovoltaïque dépasse la puissance requise par la charge, il y aura un excès de puissance qui permettra d'alimenter l'électrolyseur. L'électrolyseur à son tour, fournira de l'hydrogène à stocker dans un réservoir pour alimenter la pile à combustible afin de générer l'énergie électrique nécessaire à la charge lorsque le PV n'est pas en mesure de répondre aux exigences de la charge.

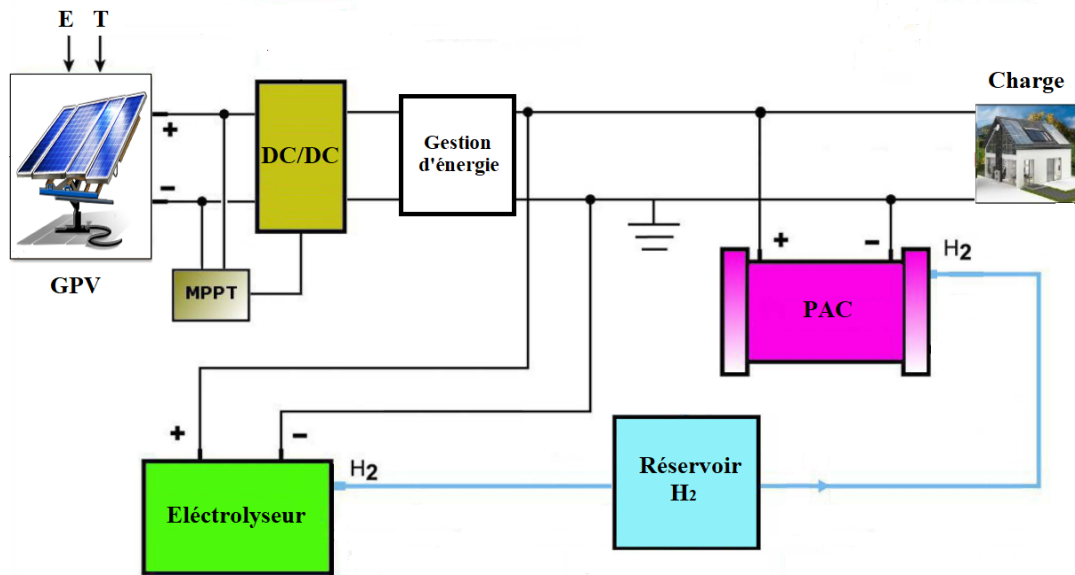


Figure V.1 : Principaux composants du système PV/hydrogène

V.3. Présentation du site étudié

De par sa position géographique et ses caractéristiques climatiques, la Wilaya de Laghouat fait partie des Wilayas du Sud Algérien. Sa superficie est de 25052 km² pour une population estimée actuellement à 600 milles habitants, son climat est semi-aride. Les coordonnées géographiques de Laghouat sont les suivantes : Latitude 33.80°, Longitude 2.87° et altitude de 750 m. Le site étudié se trouve entre la commune de Laghouat et la commune d'El-Khneg. Ce site est une zone industrielle qui est loin du réseau électrique [52].



Figure V.2 : La région étudié (Kheng, Laghouat)

V.4. Dimensionnement des composants du système hybride PV/Hydrogène

La première étape du choix d'un système pour une application en site isolé consiste à dimensionner l'installation en fonction de la consommation de l'utilisateur. Dans notre étude, on doit dimensionner le GVP, l'électrolyseur, la pile et le réservoir d'hydrogène. La puissance des composants et la taille du stockage ont été sélectionnées selon les critères définis ci-dessous.

V.4.1. Besoins énergétiques et profil de charge

Une étape importante dans la conception du système est l'estimation des besoins en énergie de l'utilisateur. Le tableau (V.3) suivant montre le cahier de charge des besoins énergétiques de deux jours de l'année d'une maison située dans le site étudié, les jours choisis sont le 31 Décembre 2021 (jour hivernal) et le 14 Juin 2021 (jour estival) :

Tableau V.1: Besoins énergétiques d'un habitat individuel

Équipement	Puissance (W)	Nombre	Heures/Jour		Consommation (Wh/J)	
			Été	Hivers	Été	Hivers
Eclairage	30	8	3	2	720	480
Surpresseur	750	1	2	2	1500	1500
Téléphone	10	2	6	6	120	120
Machine à laver	380	1	1	1	380	380
Télévision	100	2	4	4	800	800
Frigidaire	120	2	6	5	1440	1200
Congélateur	140	1	4	3	560	420
Climatiseur	2600	1	3	0	7800	0
PC portable	80	1	6	6	480	480
Total	/	/	/	/	13800	5380

La consommation électrique d'un habitat varie d'une saison à une autre à cause de la durée de jour et l'utilisation ou pas de quelques équipements électriques, la consommation énergétique de la maison est d'environ 5320 Wh/jour dans un jour hivernal et 13800 Wh/jour dans un jour estival.

Une étude précise de simulation nécessite une base temporelle plus élevée pour les données de charge de l'utilisateur. Par conséquent, la courbe de charge envisagée sur la période d'étude doit être disponible sur une base horaire. La figure (V.6) montre le profil horaire de consommation durant 24 heures pour les deux jours choisis.

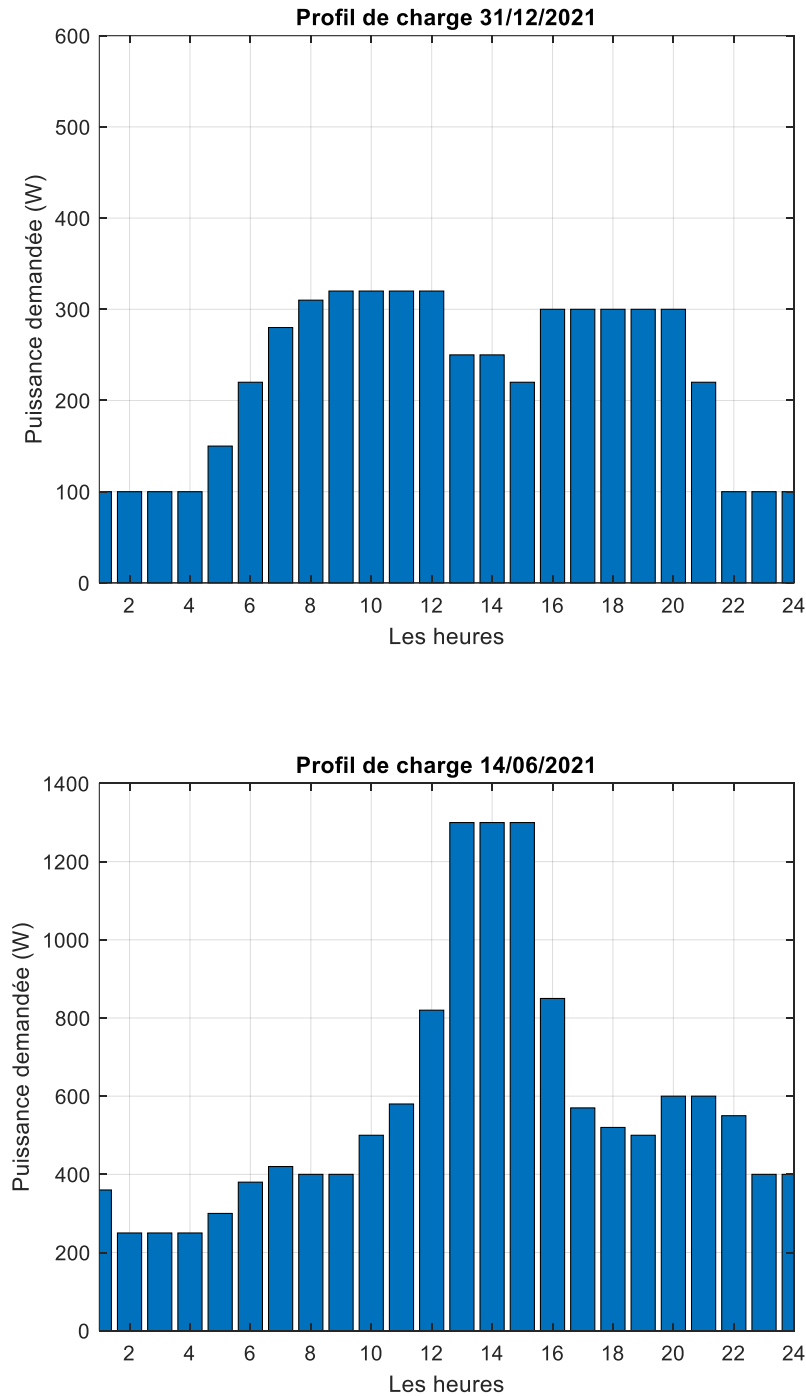


Figure V.3 : Profil de la charge le 31/12/2021 et le 14/06/2021

V.4.2. Dimensionnement du générateur photovoltaïque

Tout système photovoltaïque nécessite un dimensionnement avant son installation. Le dimensionnement consiste à déterminer la taille du champ photovoltaïque et du stockage de la puissance, en tenant compte des conditions d'ensoleillement de la demande énergétique et du coût des éléments.

Un système photovoltaïque fonctionne sous une règle fondamentale : l'énergie produite par le générateur PV devra être supérieure ou égale à l'énergie consommée par l'utilisateur. Pour dimensionner un GPV, il faut suivre les étapes suivantes [70] :

- On calcule E_c ; l'énergie qui sera consommée par l'utilisateur chaque jour en Wh.
- On calcule E_p ; l'énergie à produire chaque jour en Wh où : $E_p = \frac{E_c}{k}$;

k : est un coefficient de correction qui tient compte les pertes d'énergie à cause de l'incertitude météorologique, vieillissement, poussière, pertes dans les câbles de connexion, rendement des convertisseurs, etc. En générale, ce coefficient varie entre 60 et 70%.

- On calcule P_c ; la puissance crête du générateur photovoltaïque où : $P_c = \frac{E_p}{I_r}$;
 I_r : est l'irradiation solaire journalière moyenne de la région en kWh/m².jour.

- On calcule N_{pv} ; le nombre des panneaux PV comme suit : $N_{pv} = \frac{P_c}{P_{pv}}$;
 P_{pv} : est la puissance crête du panneau PV utilisé.

D'après cette règle, on peut calculer le nombre des panneaux PV nécessaire pour l'alimentation de la maison en électricité. L'irradiation globale journalière à la région de Laghouat est égale à 3.5 kWh/m²/jour au mois de Janvier et Décembre et 7.5 kWh/m²/jour au mois de Juin. Les panneaux PV utilisés sont de type AREI-230W.

Tableau V.2: Calcule de nombre de panneaux PV nécessaire

	31 Décembre 2021	14 Juin 2021
Consommation (Wh/J)	5380	13800
Energie à produire (Wh/J)	8277	21230
La puissance crête (W)	2365	6066
Nombre de panneaux PV	10	26

V.4.3. Dimensionnement de la pile à combustible et l'électrolyseur

Le dimensionnement de la pile à combustible et de l'électrolyseur consiste à déterminer la puissance de chaque composant. La puissance du GPV est environ 2.3 kW pour le 31 Décembre 2021 et environ 6 kW le 14 Juin 2021. La puissance de la pile doit correspondre à la puissance maximale demandée par l'utilisateur, l'électrolyseur est de puissance égale à la différence maximale entre la puissance crête du GPV et la charge minimale de l'utilisateur afin de convertir la totalité de puissance excédentaire [71-73].

$$P_{pac} = P_{ch-max} \quad (V.1)$$

$$P_{ele} = P_{pv} - P_{ch-min} \quad (V.2)$$

La puissance de la pile à combustible est environ 1.5 kW, celle de l'électrolyseur est 6 kW.

V.4.4. Réservoir de stockage

L'hydrogène que produit l'électrolyseur puis consommé par la pile à combustible est stocké dans un réservoir, dit réservoir d'hydrogène. Ce dernier fournit de l'hydrogène à la pile à combustible en l'absence de production d'énergie par le GPV afin de répondre à la demande de charge du consommateur. Le modèle de stockage de gaz sous pression décrit ci-dessous était développé par Griesshaber and Sick en 1991. Cependant, au modèle utilisé dans cette thèse est incluse l'équation des gaz réels de van der Waals. Ainsi, pour le calcul de la pression deux options sont incluses [58].

Selon la loi des gaz parfaits, la pression P_r du réservoir de stockage de gaz peut être calculée à partir de :

$$P_r = z \cdot \frac{nRT}{V} \quad (V.3)$$

Selon l'équation d'état de van der Waals, la pression P_r des gaz réels stockés dans le réservoir peut être calculée par :

$$P_r = z \cdot \frac{nRT}{V - nb} - a \frac{n^2}{V^2} \quad (V.4)$$

où

$$a = \frac{27 \cdot R^2 T_c^2}{64 P_c} \quad \text{et} \quad b = \frac{RT_c}{8 P_c}$$

P_r : Pression du réservoir (Pascal).

n : Nombre de moles.

T : Température de fonctionnement (Kelvin).

V : Volume de stockage (m^3).

R : Constante des gaz parfaits (8,314 J/K/mol).

z : Facteur de compressibilité en fonction de la pression, $z \approx 1$.

T_c : Température critique (Kelvin).

P_c : Pression critique (Pascal).

V.5. Gestion d'énergie du système hybride

Dans un système hybride autonome, la gestion efficace de l'énergie est nécessaire pour atteindre la fiabilité et la rentabilité de l'électricité produite. Une stratégie de gestion optimale d'un système PV/Hydrogène est présentée ci-dessous, la stratégie est conçue pour satisfaire les demandes de charge de la maison tout au long de la journée et la nuit. Dans cette étude, la demande de charge, doit être satisfaite principalement par GPV, le manque d'énergie est couvert par la pile à combustible. La différence entre la production d'électricité PV et la demande de charge à tout moment peut être calculée comme suit [17,53,54,58] :

$$\Delta P(t) = P_{pv}(t) - P_{ch}(t) \quad (V.5)$$

Où : $P_{pv}(t)$ et $P_{ch}(t)$ sont respectivement, la puissance produite par le GPV et puissance de la charge à chaque moment.

La stratégie, consiste à ce que l'utilisation de l'énergie générée par le GPV soit prioritaire par rapport à celle fournie par la pile à combustible pour satisfaire la demande d'énergie.

Si la puissance totale générée par le GPV est supérieure à la demande, la puissance supplémentaire sera envoyée à l'électrolyseur pour générer de l'hydrogène. L'électrolyseur est maintenu en fonctionnement tant que la puissance disponible existe et que la pression du réservoir augmente par rapport à la valeur initiale.

Si la puissance totale générée par le GPV est égale à la puissance demandée par la charge, il y'aura pas d'échange de puissance et la demande totale est satisfaite par le GPV.

Enfin, Si la puissance électrique totale générée par le GPV est inférieure à la demande, l'alimentation sera fournie par la pile et la pression du réservoir diminue à partir de la dernière valeur atteinte. La puissance produite par la pile à combustible peut être calculée comme :

$$P_{pac}(t) = P_{ch}(t) - P_{pv}(t) \quad (V.6)$$

L'objectif est de réduire l'utilisation la pile à combustible aussi moins que possible le long de la journée. Il y a quatre modes de fonctionnement :

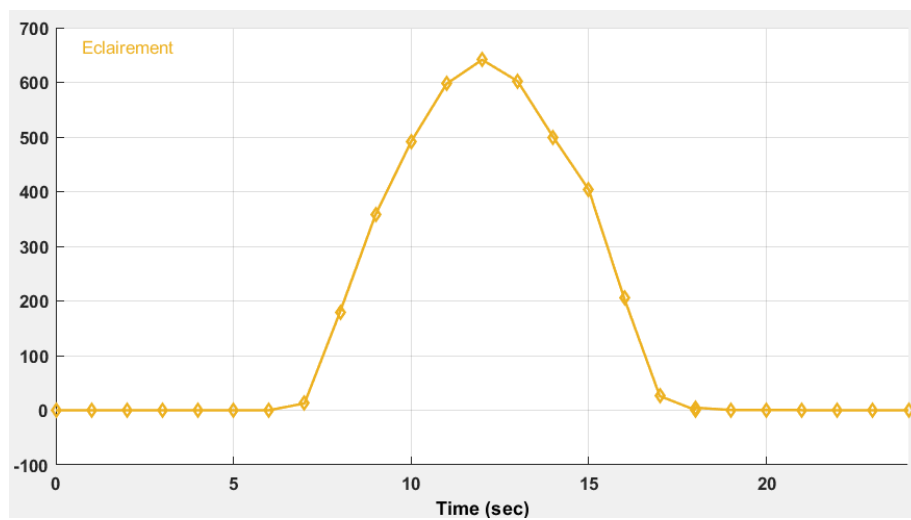
- Le GPV fournit l'énergie électrique à la charge, l'électrolyseur et la pile à combustible sont à l'arrêt.
- Le GPV fournit l'énergie électrique à la charge et à l'électrolyseur (qui est en marche) et la pile à combustible à l'arrêt.
- Le GPV et la pile à combustible fournissent l'énergie électrique à la charge et à l'électrolyseur à l'arrêt.
- La pile à combustible fournit l'énergie électrique à la charge, et le GPV et l'électrolyseur sont à l'arrêt.

V.6. Résultats de simulation du système hybride PV/Hydrogène

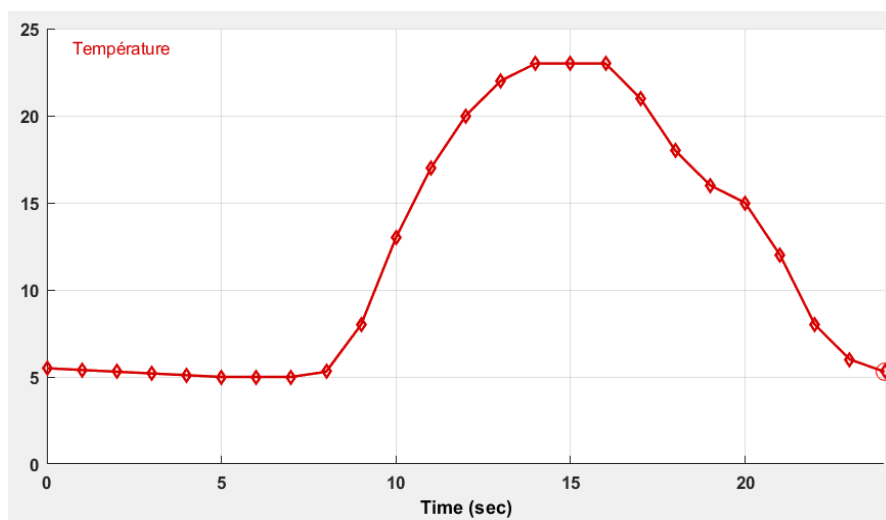
Afin de mener une simulation du système énergétique hybride PV/Hydrogène, les données relatives à la demande d'énergie (Charge) et les données climatiques (Eclairement solaire et température) sont nécessaires. Ici, le système est conçu pour alimenter en énergie électrique une maison qui se trouve loin des lignes électriques traditionnelles. Un profil de charge typique est utilisé pour l'étude de cette simulation. Pour les besoins de convenance, le profil de demande de charge est donné le long d'une journée de 24 heure (Figure V.6). Les données météorologiques requises pour le système hybride PV/Hydrogène analysé dans ce travail sont l'éclairement solaire en (W/m^2) et la température ambiante en ($^{\circ}C$). Ces données sont fournies au modèle de simulation sur une base horaire, elles sont obtenues à l'aide du central SKTM. Dans le cas où les données du gisement solaire ne sont pas disponibles, le modèle de Liu & Jordan approprié un bon modèle d'estimation du rayonnement solaire.

Deux journées choisies afin d'évaluer le comportement du système PV/Hydrogène à savoir le 31 décembre 2021 (jour hivernal) et le 14 juin 2021 (jour estival).

➤ Le 31 décembre 2021



(a)



(b)

Figure V.4 : Profil de l'éclairement global et de la température le 31/12/2021

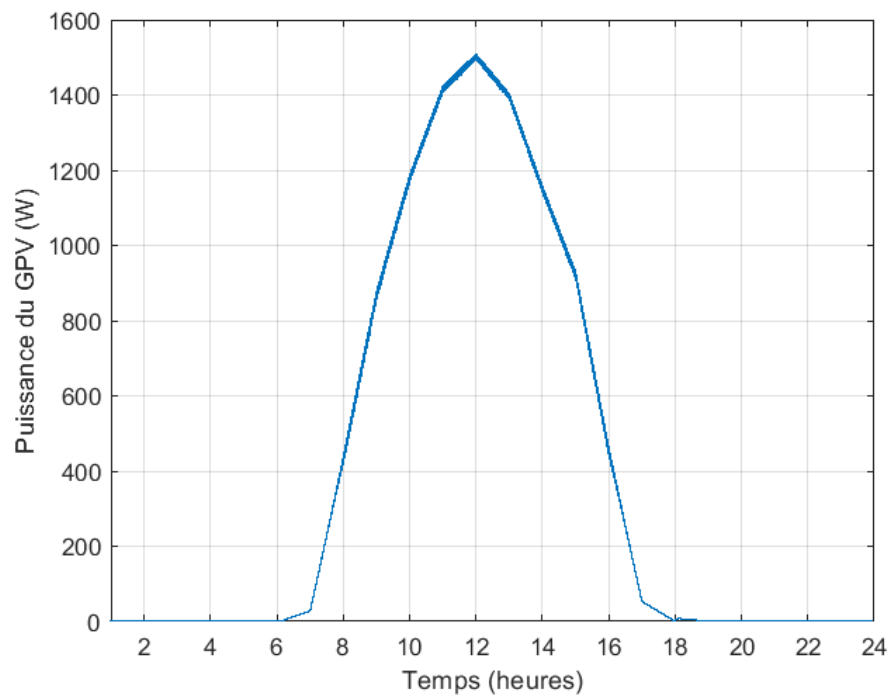


Figure V.5 : Puissance du GPV

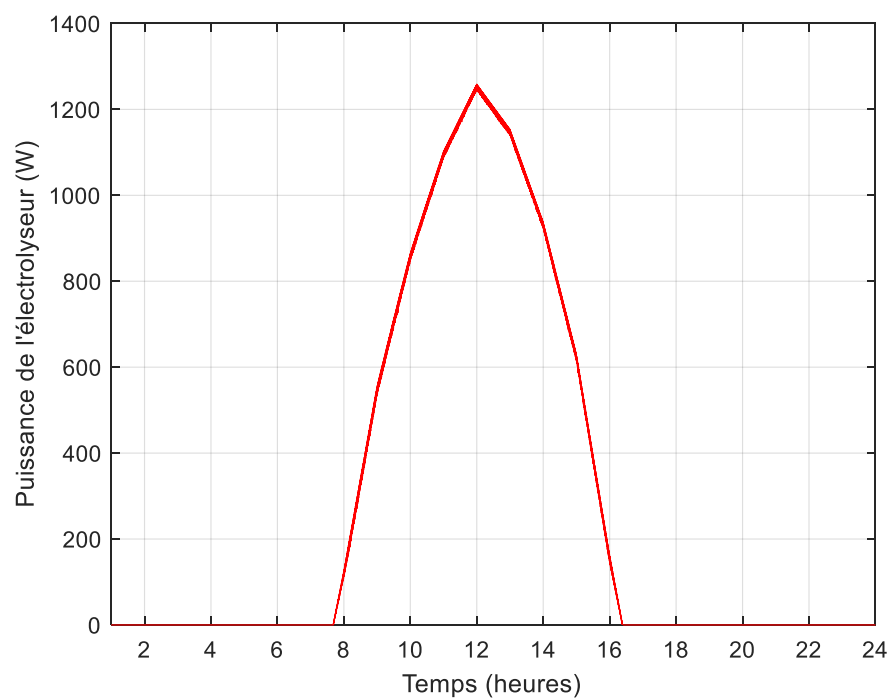


Figure V.6 : Puissance de l'électrolyseur

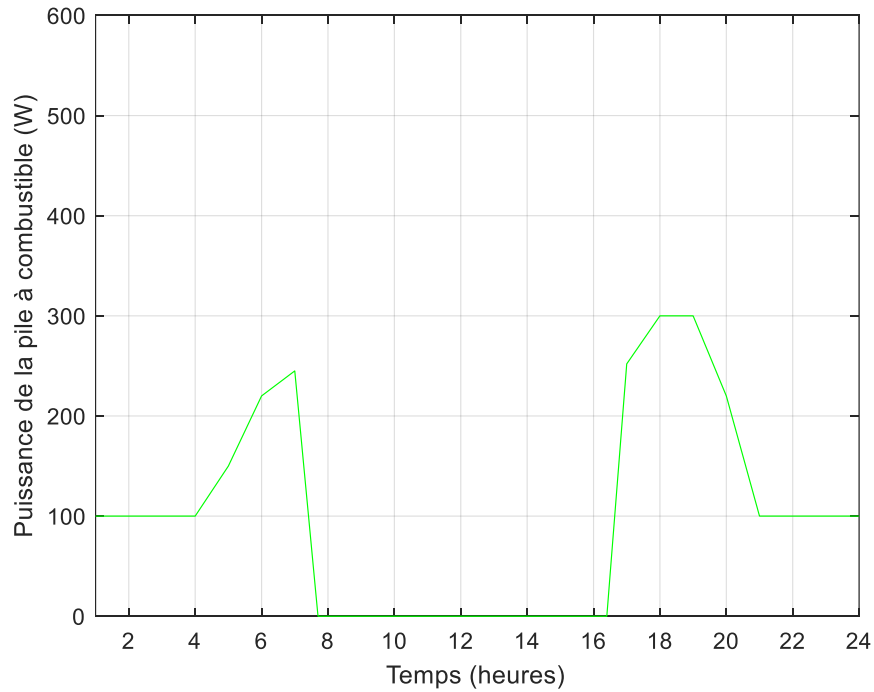


Figure V.7 : Puissance de la pile à combustible

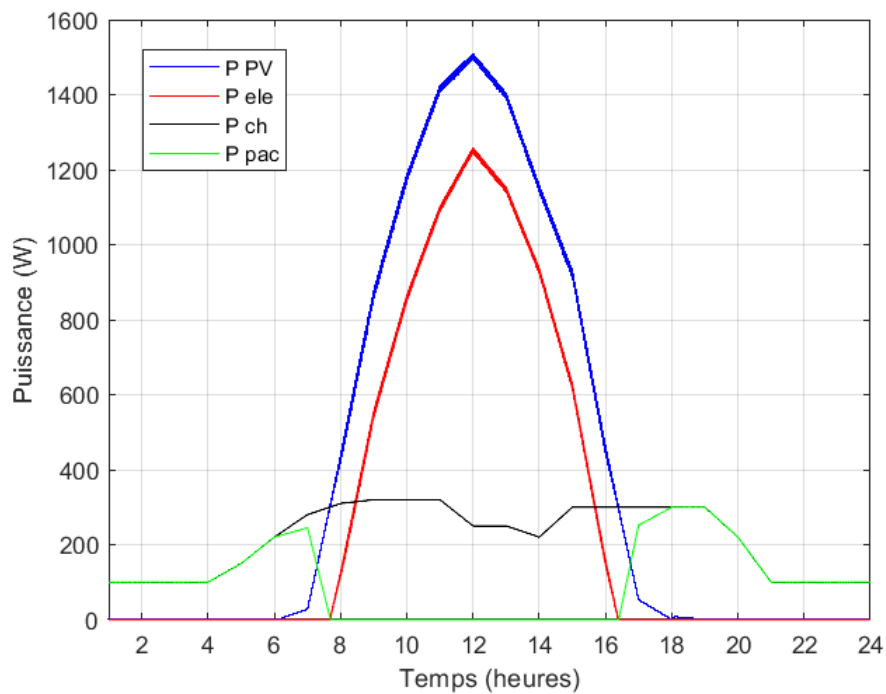
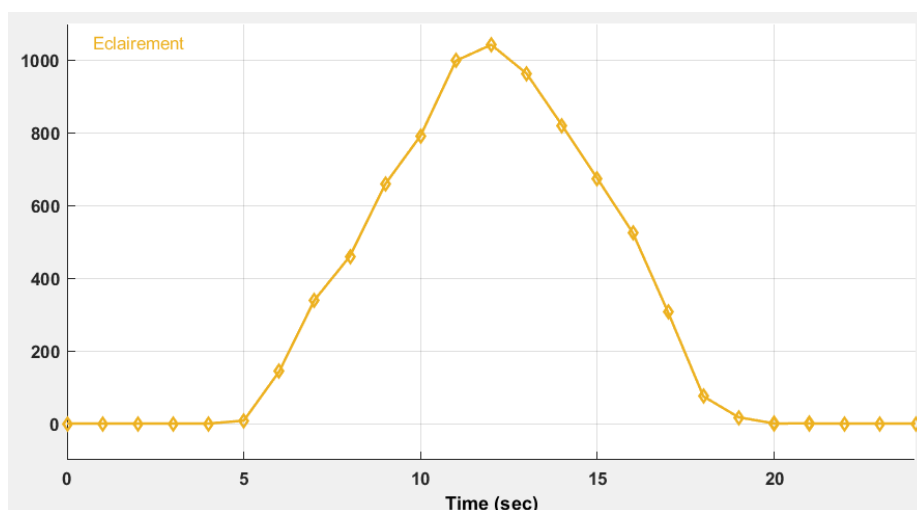


Figure V.8 : Puissance de tous les composants du système hybride

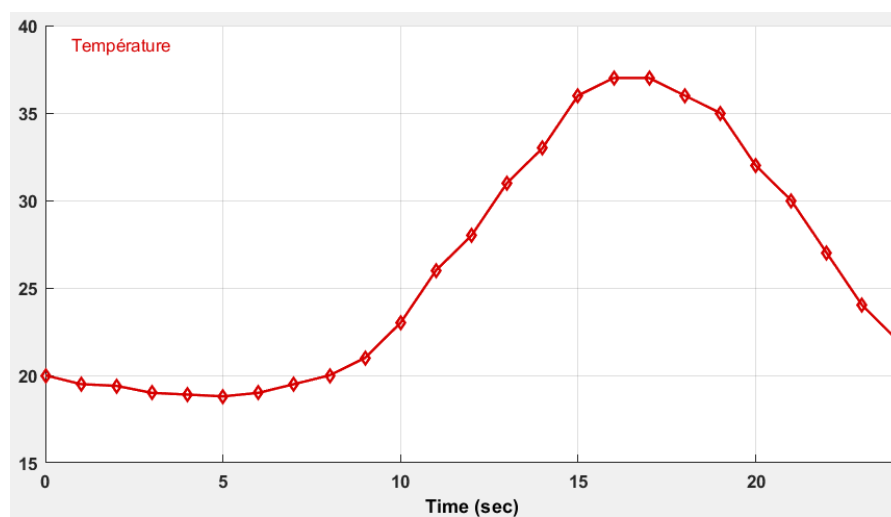
Les figures (V.8), (V.9), (V.10) et (V.11) montrent la variation de puissance du GVP, de l'électrolyseur, de la charge et de la pile à combustible durant 24 heures. On voit clairement que la puissance générée par le GPV avant le lever du Soleil est égale à zéro (de minuit à 6h00) car il

n'y a pas du rayonnement solaire, le GPV n'est pas capable de répondre à la demande de puissance de charge qui varie entre 100 et 220 W, ce qui conduit à une intervention de la pile à combustible qui couvre la puissance demandée par la charge. L'absence de génération d'électricité pendant cet intervalle implique la mise en veille de l'électrolyseur. A partir de 06h00 du matin, l'éclairement solaire commence à apparaître et cause l'apparition d'un courant et par conséquent une puissance aux bornes du GPV mais cette puissance reste inférieure à la puissance de charge donc le GPV est incapable de répondre à la demande de charge, la pile à combustible continue de fonctionner pour combler le manque de puissance requise. A environ 7h30 et jusqu'à 16h30, la demande de charge est entre 200 et 320 W, la puissance fournie par le GPV est largement supérieure à celle de la charge, il satisfait la demande de la charge et l'excès de puissance est consommé par l'électrolyseur qui produit l'hydrogène. La pile à combustible est mise en position d'arrêt. À partir de 16h30, le rayonnement solaire continue sa diminution et le GPV est incapable de répondre à la demande de la charge, sa puissance est inférieure à la puissance de charge alors il est nécessaire l'intervention de la pile à combustible pour fournir le manque de puissance. Ainsi, l'électrolyseur passe en mode veille et il n'y a plus de production d'hydrogène. Jusqu'à 18h00, le GPV alimente la charge avec une petite puissance qui est inférieure à celle demandée et la pile à combustible continue son rôle complémentaire de GPV. A partir de 18h00 heure de coucher du Soleil et jusqu'à minuit, le GPV cesse de fonctionner et la demande de charge est satisfaite seulement par la pile à combustible.

➤ **Le 14 Juin 2021**



(a)



(b)

Figure V.9 : Profil de l'éclairement global et de la température le 14/06/2021

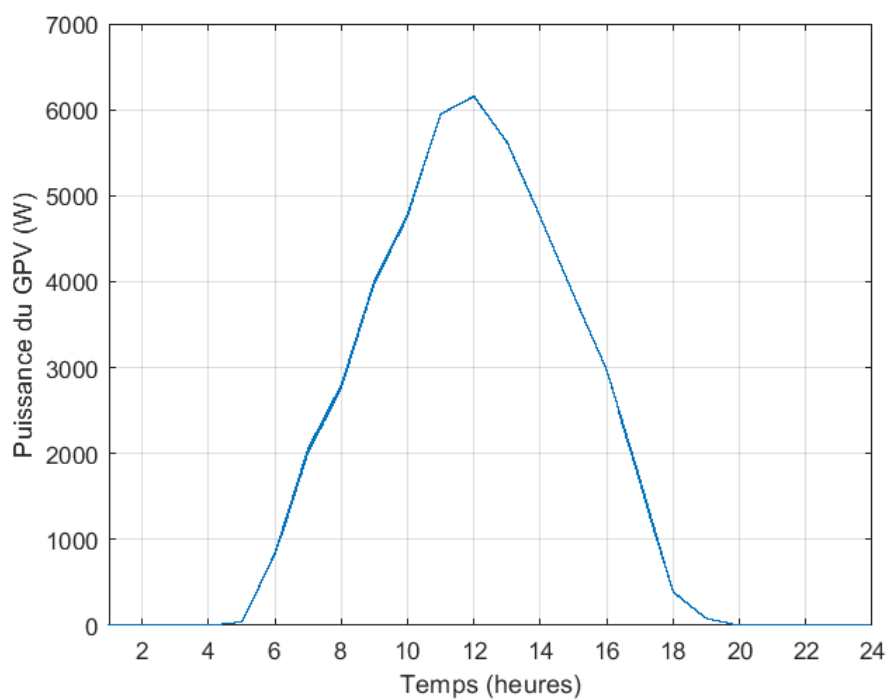


Figure V.10 : Puissance du GPV

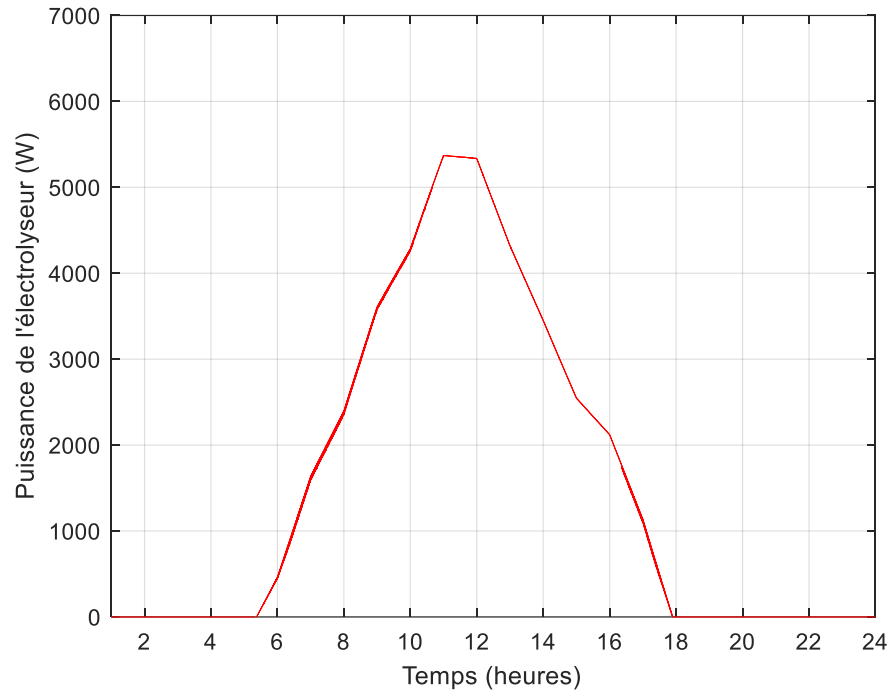


Figure V.11 : Puissance de l'électrolyseur

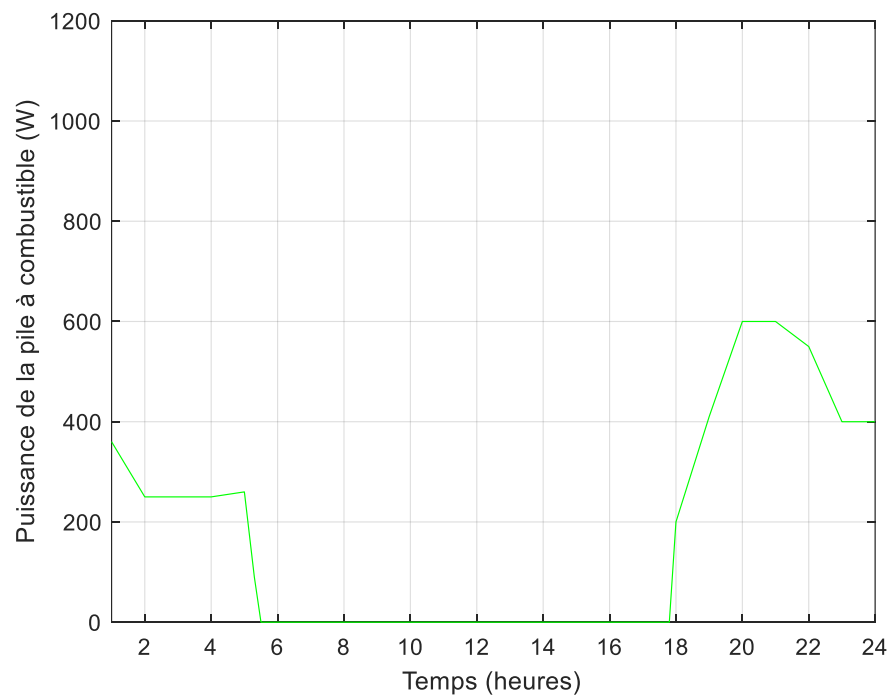


Figure V.12 : Puissance de la pile à combustible

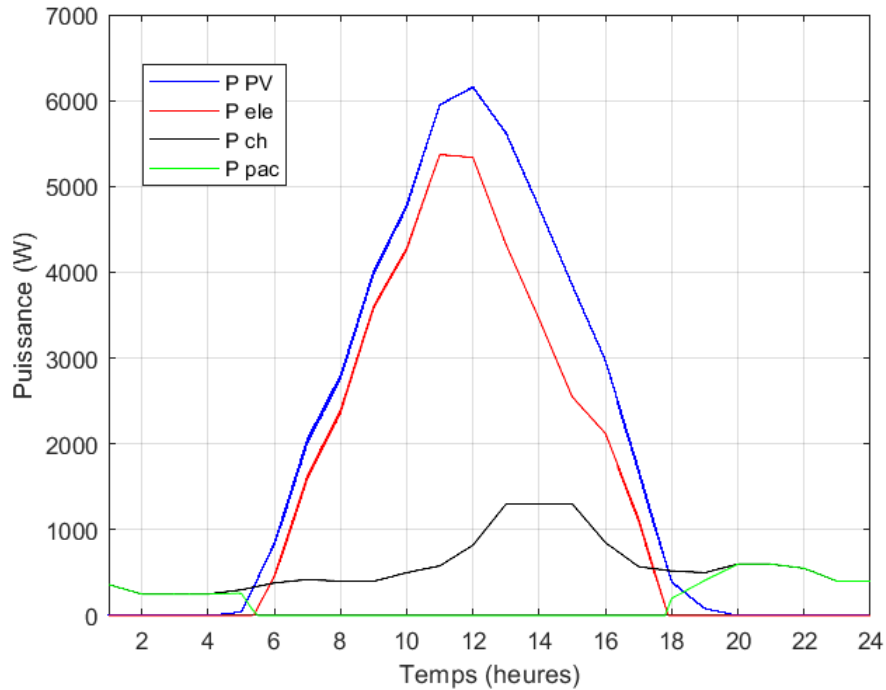


Figure V.13 : Puissance de tous les composants du système hybride

La variation de puissance du GVP, de l'électrolyseur, de la charge et de la pile à combustible durant 24 heures sont présentées aux figures (V.13), (V.14), (V.15) et (V.16). De minuit à 05h00, la puissance du GPV est nulle car elle est en fonction du rayonnement solaire qui est lui aussi nul. Par conséquent le GPV est incapable de répondre à la demande de puissance de charge qui varie autour de 300 W. Cela rend nécessaire l'intervention de la PAC. Pendant cet intervalle, la puissance de la pile est égale à la puissance de charge, la pile fonctionne et fournit la puissance demandée par la charge en l'absence du GPV, la stratégie de contrôle d'énergie citée dans ce chapitre est utilisée pour ajuster la puissance de la pile à la puissance requise. La puissance de l'électrolyseur est égale à zéro, car il n'y a pas d'excès de puissance générée par le GPV donc l'électrolyseur ne fonctionne pas et il n'y a pas d'hydrogène produit. A partir de 05h00 du matin, l'éclairement solaire commence à apparaître provoquant l'apparition d'un courant aux bornes du GPV impliquant une génération d'énergie. Tant que la puissance du GPV n'est pas encore suffisante pour répondre à la demande de charge, la pile à combustible continue de fonctionner pour combler le manque de puissance requise. Par exemple, à 05h00 du matin, la demande de charge est d'environ 300 W, tandis que le GPV fournit moins de 50 W, la pile doit fournir la puissance manquante pour le fonctionnement de la charge. Le fonctionnement du système hybride change à partir de 05h30 et jusqu'à 18h00, la puissance fournie par le GPV dépasse le 6 kW en raison de la croissance continue du rayonnement solaire.

Cette puissance couvrira la demande de la charge durant cet intervalle. La pile à combustible cesse de fonctionner et laisse la place au fonctionnement de l'électrolyseur. Tant que la puissance fournie par le GPV est supérieure à la puissance de la charge, le système évolue dans le même sens jusqu'à ce que le GPV devienne incapable de couvrir la demande de charge. À partir de 18h00 et jusqu'à minuit, le GPV devient incapable de répondre à la demande de la charge, cette situation nécessite l'intervention de la pile à combustible pour fournir le manque de puissance. Le même fonctionnement décrit dans le premier intervalle est valable pendant cette période.

V.7. Conclusion

Dans ce chapitre, la simulation du système hybride PV/Electrolyseur/Pile à combustible est présentée. Le GPV est la principale source de production de l'électricité. L'électrolyseur fonctionne telle une charge en utilisant l'énergie excédentaire pour produire de l'Hydrogène. La pile à combustible est le générateur secondaire de puissance électrique, elle fonctionne pour palier au déficit de puissance demandée par la charge et contribuer à l'équilibre énergétique entre la puissance fournie par le GPV et la charge. Les résultats de simulation sont exploités pour vérifier les performances du système sous différents scénarios au moyen de données climatiques réelles et des profils de charges pratiques. Nos résultats montrent bien que la méthode choisie de la gestion d'énergie est efficace et la demande de charge est gérée avec succès.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives

La conversion photovoltaïque est l'un des modes les plus intéressants d'utilisation de l'énergie solaire. Elle permet d'obtenir de l'électricité de façon directe et autonome à l'aide d'un matériel fiable et de durée de vie relativement élevée, permettant ainsi une maintenance réduite. L'intermittence de production de l'électricité solaire à cause des perturbations climatiques nécessite d'intégrer une autre source de production de l'électricité afin de répondre aux exigences énergétiques de l'utilisateur.

Notre contribution dans ce travail est de proposer un moyen de stockage et de production de l'électricité qui permettra de remplacer les batteries dans une installation photovoltaïque. A cet effet, l'idée consiste à stocker l'électricité excédentaire produite par la source PV sous forme d'hydrogène par l'électrolyseur puis la restituer pour générer l'énergie électrique par une pile à combustible lors de déficit des besoins énergétiques. Le stockage basé sur l'hydrogène via un électrolyseur constitue une solution optimale pour satisfaire aux exigences des systèmes d'alimentation autonome. Le générateur photovoltaïque commandé par une technique MPPT est la source principale de production de l'électricité ; l'excès de l'énergie produite par le GPV est orienté vers un électrolyseur assurant la production d'hydrogène. La pile à combustible utilise l'hydrogène stocké pour combler aux manques des besoins énergétiques lorsque le GPV est incapable d'assurer la totalité de l'énergie demandée.

Le travail de cette thèse a porté sur la modélisation et la simulation du fonctionnement d'un système hybride PV/Hydrogène alimentant une maison située dans un site isolé, ce système est géré par une méthode de gestion d'énergie pour satisfaire la demande de charge.

Dans un premier temps, nous avons donné quelques statistiques sur la production énergétique au niveau mondial, puis nous avons présenté un état de l'art sur les systèmes hybrides et les travaux de recherches réalisés dernièrement pour hybrider le système PV, le principe de fonctionnement, les caractéristiques électriques de la cellule PV ainsi que l'effet de la température et de l'éclairement solaire sont présentées et simulées. Dans le deuxième et troisième chapitre de ce travail, plusieurs commandes MPPT ont été étudiées, simulées et

comparées. La commande P&O modifiée montre une bonne fiabilité et précision par rapport aux autres techniques, elle est adaptée aux changements brusques des conditions météorologiques telles que la température et l'éclairement solaire et présente un bon suivi de puissance maximale du GPV. Des descriptions détaillées sur le principe général des composants électrochimiques (pile à combustible et électrolyseur) ainsi que leurs modèles et caractéristiques électriques sont présentées dans le quatrième chapitre, ces modèles sont principalement basés sur des relations électriques et électrochimiques. Dans le dernier chapitre de cette thèse, le système hybride PV/Hydrogène est simulé sous l'environnement Matlab/Simulink. La simulation a été effectuée pour vérifier les performances du système selon différents scénarios en utilisant un profil de charge durant deux journées et des données météorologiques réelles. Les résultats montrent bien que la stratégie de gestion d'énergie est efficace et le flux énergétique entre les différentes sources d'énergie et la demande de la charge est équilibrée avec succès.

La simulation que nous avons effectuée, pour une journée en été et une journée en hiver, montre l'efficacité et la faisabilité du système hybride PV/Hydrogène. Le remplacement des technologies conventionnelles, notamment, les générateurs Diesel ou les batteries, par la technologie de l'hydrogène incluant, la pile à combustible dans les systèmes de génération électrique pour les sites isolés est technologiquement faisable, ce qui réduit l'émission d'effluents, la dépendance aux énergies fossiles et accroît l'intégration des énergies renouvelables. Toutefois, l'étude montre que la recherche et le développement technologique dans le domaine de la pile à combustible et de l'électrolyseur est plus que nécessaire. De nombreux travaux de recherche ont été réalisés à des fins d'amélioration du rendement des deux composants : la pile à combustible et l'électrolyseur.

Comme perspective, pour une conception pratique et efficace des systèmes hybrides PV/Hydrogène, il serait intéressant d'installer ces systèmes sur des sites bien exposés au rayonnement solaire. Également, la disponibilité d'une base des données de long terme de température et d'éclairement solaire est très importante pour un bon dimensionnement des besoins énergétiques d'utilisateur.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Production d'électricité, Wikipédia, l'encyclopédie libre, online : https://fr.wikipedia.org/wiki/Production_d%27%C3%A9lectricit%C3%A9, Août 2021.
- [2] Énergie renouvelable, Wikipédia, l'encyclopédie libre, online : https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_renouvelable, Août 2021.
- [3] Énergie non renouvelable, Wikipédia, l'encyclopédie libre, online : https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_non_renouvelable, 16/08/2021.
- [4] Obser'ER, l'Observatoire des Energies Renouvelables. '*La production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde*'. 2019.
- [5] International Energy Agency (IEA), Key World Energy Statistics 2020, <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2020>, Août 2020.
- [6] Énergie en Algérie, Wikipédia, l'encyclopédie libre, online : https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_en_Alg%C3%A9rie, Janvier 2022.
- [7] Guide des Energies Renouvelables. Ministère des Energies et des Mines (MEM), Algérie, online : <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-renouvelables-et-efficacite-energetique>, 2021.
- [8] S.Rahman, K.Tam. '*A feasibility study of photovoltaic-fuel cell hybrid energy system*'. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol 3, 50-55, 1988.
- [9] D.Rekioua, S.Bensmail, N.Bettar. '*Development of hybrid photovoltaic-fuel cell system for standalone application*'. International journal of Hydrogen Energy, 39, 1604-1611, 2014.
- [10] G.Bayrak, C.Mehmet. '*Grid connected fuel cell and PV hybrid power generating system design with Matlab Simulink*'. International journal of Hydrogen Energy, 39, 8803-8812, 2014.
- [11] Z.Jiang. '*Power management of hybrid Photovoltaic-Fuel Cell power systems*'. In Proceedings of the IEEE Power Engineering Society General Meeting, Montreal, QC, Canada, 18–22 June 2006.
- [12] C.Ghenai, T.Salameh, A.Merabet. '*Technico-economic analysis of off grid solar PV/Fuel cell energy system for residential community in desert region*'. International journal of Hydrogen Energy, 45, 11460-11470, 2020.

- [13] J.Kupecki et al. *'Energy analysis of a 10 kW-class power-to-gas system based on a solid oxide electrolyzer (SOE)'*. Energy Conversion and Management, 199,111934, 2019.
- [14] Mosayeb Bornapour et al. *'Probabilistic optimal coordinated planning of molten carbonate fuel cell CHP and renewable energy sources in microgrids considering hydrogen storage with point estimate method'*. Energy Conversion and Management, 206,112495, 2020.
- [15] Yanpeng Wu et al. *'IoT-enabled Microgrid for Intelligent Energy-aware Buildings : A Novel Hierarchical Self-consumption Scheme with Renewables'*. Electronics, 9, 550, 2020.
- [16] Liang Luo et al. *'Optimal scheduling of a renewable based microgrid considering photovoltaic system and battery energy storage under uncertainty'*. Journal of Energy Storage, 28,101306, 2020.
- [17] Shakti Singh, Prachi Chauhan, MohdAsimAftab, Ikbal Ali, S. M. Suhail Hussain, Taha Selim Ustun. *'Cost Optimization of a Stand-Alone HybridEnergy System with Fuel Cell and PV'*. Energies, 13, 1295, 2020.
- [18] Stéphane VIGHETTI. *'Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion'*. Thèse de doctorat, Institut polytechnique de Grenoble, France, Septembre 2010.
- [19] Stéphane PETIBON. *'Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques'*. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, France, Janvier 2009.
- [20] Khaled AMEUR. *'Contribution to the Study of a Standalone Photovoltaic System with a New Tracking Control of the Global MPP'*. Thèse de doctorat, Université Amar Tédji de Laghouat, Algérie, Avril 2018.
- [21] Kahla Sami, Bechouat Mohcene, Amieur Toufik, Feraga Chams-Eddine, Sedraoui Moussa. *'A Comparison Study: Direct and Indirect Mode Control of Perturb and Observe-MPPT Algorithms for Photovoltaic System'*. 1st International Conference on Sustainable Renewable Energy Systems and Applications (ICSRESA), December 04-05, 2019, Tébessa, Algeria.
- [22] Roberto faranda, sonia leva. *'A Comparative Study of MPPT techniques for PV Systems'*. 7th WSEAS International Conference on Application of Electrical Engineering (AEE'08), Trondheim, Norway, 2008.
- [23] S. Messalti, A. Harrag & A. Loukriz. *'A new PSO-PID variable step size MPPT controller for PV systems under fast changing atmospheric conditions'*. Revue des Energies Renouvelables Vol. 20 N°4 (2017) 555 – 571.

- [24] Laid ZAROOUR. *'Etude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien hors réseau'*. Thèse de doctorant en science, Université Mentouri de Constantine, Algérie, 2010.
- [25] Djamal Eddine SILA. *'Etude comparative entre trois techniques de commande d'un générateur photovoltaïque'*. Mémoire de Master, Université Amar Tédji Laghouat, Algérie, 2012.
- [26] Hanen Abbes, Hafedh Abid, Kais Loukil, Ahmad Toumi, Mohamed Abid. *'Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque'*. Revue des Energies Renouvelables Vol. 17 N°3 (2014) 435 – 445.
- [27] Mohcine Mokhlis, Mohammed Ferfra, Hemeyine Ahmed Vall, Rafika El idrissi, and Cheikhne Cheikh Ahmed. *'Comparative Study Between the Different MPPT Techniques'*. 5th International Conference on Renewable Energies for Developing Countries (REDEC), (2020).
- [28] Jyotirmayee Priyadarshini. *'Modelling and simulation of PV system with fuzzy Mppt based converter'*. International Conference on Recent Innovations in Electrical, Electronics & Communication Engineering, (ICRIEECE), 978-1-5386-5995-3/18, 2018.
- [29] Abdelilah Chalh et al. *'Trusted Simulation Using Proteus Model for a PV System : Test Case of an Improved HC MPPT Algorithm'*. Energies 2020, 13, 1943 ; doi :10.3390/en13081943, 2020.
- [30] Nabil ABOUCHABANA. *'Etude d'une nouvelle topologie Buck-Boost appliquée à un MPPT'*. Mémoire de magister, Ecole National Polytechnique (ENP) Alger, Algérie, Juin 2009.
- [31] Priyanka Sharma, Vijay Kumar Garg. *'Solar power generation using off grid system'*. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), e-ISSN : 2395 -0056, p-ISSN : 2395-0072, 2016.
- [32] Boukli-Hacene Omar. *'Conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleur gestion énergétique'*. Mémoire de Magister, Université Aboubaker Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2011.
- [33] M.Angel Cid Pastor. *'Conception et réalisation de Modules Photovoltaïques Electroniques'*. Thèse de Doctorat en Science, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, France, 2006.
- [34] Emmanuel Kwaku Anto, Johnson A. Asumadu, Philip Yaw Okyere. *'PID control for improving P&O-MPPT performance of a grid-connected solar PV system with Ziegler-Nichols tuning method'*. 11th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). IEEE, DOI : 10.1109/ICIEA.2016.7603888, 2016.

- [35] Emmanuel Kwaku Anto, Johnson A. Asumadu, Philip Yaw Okyere. '*PID-based P&O MPPT Controller for Offgrid Solar PV Systems Using Ziegler-Nichols Tuning Method to Step, Ramp and Impulse Inputs*'. Journal of Multidisciplinary Engineering Science Studies (JMESS), ISSN : 2458-925X, Vol. 2 Issue 7, July 2016.
- [36] Jyotirmaya Sahoo, Susovon Samanta & Shamik Bhattacharyya. '*Adaptive PID Controller with P&O MPPT Algorithm for Photovoltaic System*'. IETE Journal of Research, 66:4, 442-453, DOI: 10.1080/03772063.2018.1497552, 2020.
- [37] S. K. Kollimalla & M. K. Mishra. '*A novel adaptive P&O MPPT algorithm considering sudden changes in the irradiance*'. IEEE Transactions on Energy conversion, vol. 29, no. 3, pp. 602–610, 2014.
- [38] Guellal Amar, Mokhtari Abderrahmane, Kherchi Mohamed. '*La Commande MPPT Basée sur les Algorithmes Intelligents Destinée aux Applications Photovoltaïques : Etude comparative et implémentation sur FPGA*'. The 4th International Seminar on New and Renewable Energies, October 24-25, 2016, Ghardaïa, Algeria.
- [39] Rekioua D. & Matagne E. '*Optimization of Photovoltaic Power Systems Modelization, Simulation and Control*'. In : Renewable and Green Energy. Springer, ISBN : 978-1-4471-2403-0, London, 2012.
- [40] Verma D., Nema S., Shandilya, A. M. & Dash, S.K. (2016). '*Maximum power point tracking (MPPT) techniques: Recapitulation in solar photovoltaic systems*'. Renew. Sustain. Energy Rev. 2016, 54, 1018–1034.
- [41] Yassine LASMI. '*Optimisation de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) d'un système photovoltaïque par les techniques intelligentes*'. Mémoire de Magister, université de Sétif, Algérie, 2013.
- [42] Issam Abadlia, Linda Hassaine, Antar Beddar, Fateh Abdoune & Mohammed R. B. '*Adaptive fuzzy control with an optimization by using genetic algorithms for grid connected a hybrid photovoltaic-hydrogen generation system*'. International Journal of Hydrogen energy, 45 (2020), 22589-22599.
- [43] A. Ibrahim, Raef Aboelsaud & S. Obukhov. '*Improved particle swarm optimization for global maximum power point tracking of partially shaded PV array*'. Electrical Engineering (2019) 101:443–455.
- [44] Daniel W. Hart. '*Power Electronics*'. McGraw-Hill, 2011.

- [45] Ilyas ROUGAB, Ali CHEKNANE & Nabil ABOUCHABANA. 'Study and simulation of MPPT techniques to control a stand-alone photovoltaic system under varying irradiance'. Romanian Journal of Information Technology and Automatic Control, Vol. 31, No. 4, 109-122, 2021.
- [46] Samer RABIH. 'Contribution à la modélisation de systèmes réversibles de types électrolyseur et pile à hydrogène en vue de leur couplage aux générateurs photovoltaïques'. Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, France, Octobre 2008.
- [47] Craig A. Grimes, Oomman K. Varghese, Sudhir Ranjan. 'Light, Water, Hydrogen, The Solar Generation of Hydrogen by Water Photoelectrolysis'. Springer, 2008.
- [48] DJAFOUR Ahmed. 'Etude d'un système de production d'hydrogène solaire'. Thèse de doctorat, Université Kasdi Merbah – OUARGLA, Algérie, Mars 2013.
- [49] Christophe DARRAS. 'Modélisation de systèmes hybrides Photovoltaïque/Hydrogène : Applications site isolé, micro-réseau, et connexion au réseau électrique dans le cadre du projet PEPITE (ANR PAN-H)'. Thèse de doctorat, Université de Corse-Pascal Paoli, France, 2011.
- [50] Bonghwan Lee, Kiwon Park and Hyung-Man Kim. 'Dynamic Simulation of PEM Water Electrolysis and Comparison with Experiments'. Int. J. Electrochem. Sci., 8 (2013) 235 - 248.
- [51] Olivier Rallières. 'Modélisation et caractérisation de Piles A Combustible et Electrolyseurs PEM'. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, France, Novembre 2011.
- [52] HADJAÏSSA Aboubakeur. 'La gestion optimisée d'énergie électrique hybride Photovoltaïque/Pile à combustible'. Thèse de doctorat, École Nationale Polytechnique (ENP), Alger, Algérie, 2016.
- [53] Nabil Tlili, BechirNeily, Fatma Ben Salem. 'Modeling and Simulation of Hybrid System Coupling a Photovoltaic Generator, a PEM Fuel Cell and an Electrolyzer (Part I)'. IEEE 11th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD14), 2014.
- [54] Nabil Tlili, BechirNeily, Fatma Ben Salem. 'Modeling and Simulation of Hybrid System Coupling a Photovoltaic Generator, a PEM Fuel Cell and an Electrolyzer (Part II)'. IEEE 11th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD14), 2014.
- [55] Ahmad HADDAD. 'Modélisation dynamique non linéaire de la pile à combustible du type PEM : Application à la régulation de l'humidité dans la membrane électrolytique'. Thèse de doctorat, Université de technologie de Belfort Montbéliard, France, Juin 2009.
- [56] S. Astier, S. Rabih, C. Turpin, G. Fontes, V.Phlippoteau. 'Modélisation Multiphysique en Bond Graph d'une Pile à Combustible PEM. Application à l'Etude d'Associations de Piles'. Conférence EF 2007.ENSEEIHT, Toulouse, 6-7 Septembre 2007.

- [57] Abdelhamid KAABECHE. *‘Etude comparative entre le stockage à hydrogène et les batteries au plomb dans un système hybride (Photovoltaïque/Eolien) autonome’*. Thèse de doctorat en sciences, Ecole National Polytechnique (ENP) Alger, Algérie, Février 2012.
- [58] Mustapha HATTI. *‘Contribution à l’Étude des Systèmes Hybrides Photovoltaïque / Pile à Combustible’*. Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d’Oran, Algérie, Juillet 2010.
- [59] AZZI Halim. *‘Etude et modélisation d’une pile à combustible’*. Mémoire de Magister, Université A. Mira-Bejaïa, Algérie, Mai 2016.
- [60] A. SAADI. *‘Modélisation et commande du circuit d’air d’une pile à combustible PEMFC’*. Thèse de doctorat, Université de Biskra, Décembre 2014.
- [61] Julien LABBÉ. *‘L’hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d’électricité pour systèmes photovoltaïque isolés’*. Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, CEP, Sophia Antipolis, France, Décembre 2006.
- [62] M. N. SID, M. BECHERIF, K. MAROUANI et H. ALLOUI. *‘Gestion de l’énergie d’un système hybride pile à combustible/batterie basée sur la commande optimale’*. Mediterranean Journal of Modeling and Simulation, MJMS 03 (2015) 010-024.
- [63] Khalil Benmouiza, Ali Cheknann. *‘Analysis of proton exchange membrane fuel cells voltage drops for different operating parameters’*. International Journal of Hydrogen Energy (2017) I-8.
- [64] R. Saisset. *‘Contribution à l’étude systémique de dispositifs énergétiques à composants électrochimiques’*. Ph.D. dissertation, Thèse Laboratoire d’Électrotechnique et d’Électronique Industrielle de l’ENSEEIH, Toulouse, FRANCE, 2004.
- [65] Guillaume Fontès. *‘Modélisation et caractérisation de la pile PEM pour l’étude des interactions avec les convertisseurs statiques’*. Thèse de doctorat, INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE, 2005.
- [66] Jérôme LACHAIZE. *‘Étude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction’*. Thèse de doctorat, INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE, 2004.
- [67] Ilyes ROUGAB. *‘Simulation des modèles radiométriques intégrant les données géographiques et météorologiques’*. Mémoire de Magister, Université Amar Téliidji de Laghouat, Algérie, Octobre 2011.

- [68] El Mghouchi Y, El Bouardi A, Choulli Z, Ajzoul T. '*Models for obtaining the daily direct, diffuse and global solar radiations*'. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 56; April 2016. p. 87-99.
- [69] A. Gougui et al. '*Field experience study and evaluation for hydrogen production through a photovoltaic system in Ouargla region, Algeria*'. International journal of Hydrogen Energy, 45, 2593-2606, 2020.
- [70] A. Djafour et al. '*photovoltaic assisted fuel cell power systems*'. Energy Procedia, 50, 306-313, 2014.
- [71] Abou el-Maaty Metwally. '*Modelling and Simulation of a Photovoltaic Fuel Cell Hybrid System*'. Thèse de Doctorat, Université de Kassel, Allemagne, 2005.
- [72] Séverine BUSQUET. '*Étude d'un système autonome de production d'énergie couplant un champ photovoltaïque, un électrolyseur et une pile à combustible : réalisation d'un banc d'essai et modélisation*'. Thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Paris, France, 2003.
- [73] Keliang Zhou et al. '*Optimal energy management strategy and system sizing method for stand-alone photovoltaic-hydrogen systems*'. International journal of Hydrogen Energy, 33, 477-489, 2008.