

République Algérienne Démocratique et populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Université Saâd Dahleb, Blida-1
Faculté de Technologie
Département des Énergies Renouvelables

PROJET DE FIN D'ETUDE

Spécialité : énergies renouvelables

Option : conversion photovoltaïque

Thème :

Gestion optimale d'énergie d'un système PV/PAC
avec stockage d'hydrogène

Réalisé par : AIT MAHREZ Sofiane

ADJEROUD Bilal

Soutenu le : 15/09/2020

Devant le jury composé de :

Mr Gounounou Abd Rezak.....Président

Mme Feradji Fatima Zohra.....Examinatrice

Mr Hatti MustaphaEncadreur

Septembre 2020

ملخص

يقدم هذا العمل تحكما وإدارة مثالية لإمداد الطاقة لنظام هجين (PV/PAC) يتكون من مولد ضوئي وخلية وقود غشائية لتبادل البروتونات (PEMFC) ومحلل كهربائي وخزان لتخزين الهيدروجين. في هذا النظام يتم توفير الحمل بواسطة المولد الكهروضوئي عبر محول التيار الكهربائي (DC-DC) يحكمه نظام MPPT (متتبع نقطة الطاقة القصوى). إذا تجاوزت الطاقة التي توفرها الطاقة الكهروضوئية الطاقة المطلوبة بواسطة الحمل. فسيكوم هناك فائض من الطاقة مما يسمح بتزويد المحلل الكهربائي. سيوفر الأخير الهيدروجين الذي سيتم تخزينه في خزان لاستخدامه لاحقا في خلية الوقود (PEMFC) لإنتاج الكهرباء اللازمة لتشغيل الحمل عندما يتعذر على الكهروضوئية تلبية الطلب. تم عرض النماذج الرياضية وخصائص المكونات الرئيسية للنظام. تم وصف استراتيجية التحكم في النظام. تم تنفيذ نمذجة ومحاكاة سلوك النظام الهجين المقترح تحت Matlab/Simulink.

الكلمات المفتاحية: الكهروضوئي. خلية وقود. المحول الكهربائي. هيدروجين. نظام PV/PAC الهجين. إدارة الطاقة.

Résumé

Ce travail présente un contrôle et une gestion optimale de l'alimentation d'un système hybride PV-PAC qui est constitué d'un générateur photovoltaïque, d'une pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC), d'un électrolyseur et d'un réservoir de stockage d'hydrogène. Dans ce système, La charge est alimentée par le générateur photovoltaïque via un hacheur (DC-DC) régi par un contrôle MPPT (suivi du point de puissance maximum). Si la puissance délivrée par le photovoltaïque dépasse la puissance requise par la charge, il y aura un excès de puissance qui permet d'alimenter l'électrolyseur. Ce dernier fournira de l'hydrogène qui sera stocké dans un réservoir pour une utilisation ultérieure dans la pile à combustible (PEMFC), pour produire l'électricité nécessaire pour faire fonctionner la charge lorsque le PV est incapable de répondre aux demandes. Les modèles mathématiques et les caractéristiques des principaux composants du système sont présentés. La stratégie de contrôle du système est décrite. La modélisation et la simulation du comportement du système hybride proposésont réalisées sous MATLAB/Simulink.

Mots-clés: Photovoltaïque; Pile à combustible; Electrolyseur; Hydrogène; Système hybride PV/PAC, gestion d'énergie.

Abstract

This work presents an optimal control and management of the power supply of a PV-PAC hybrid system consisting of a photovoltaic generator, a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC), an electrolyzer and a hydrogen storage tank. In this system, the load is supplied by the photovoltaic generator via a chopper (DC-DC) governed by MPPT control (followed by the maximum power point). If the power delivered by the photovoltaic exceeds the power required by the load, there will be an excess of power, which enables the electrolyzer to be supplied. The latter will provide hydrogen, which will be stored in a tank for later use in the fuel cell (PEMFC), to produce the electricity needed to run the load when the PV is unable to meet demand. Mathematical models and characteristics of the main components of the system are presented. The system control strategy is described. The modeling and simulation of the behavior of the proposed hybrid system are carried out under MATLAB / Simulink.

Keywords: Photovoltaic; Fuel cell; Electrolyser; Hydrogen; Hybrid PV / PAC system, energy management.

Dédicaces

*Je dédie ce travail à ma très chère mère et à mon cher père
qui ont été toujours à mes côtés dans les moments difficiles,
qui m'ont tout appris, tant donné sans rien demandé en retour.
Sans eux je ne serais pas l'homme que je suis et rien n'aurait été possible.*

A et à ma sœur Nora et Mes frères Khalifa et Adel

AIT MAHREZ Sofiane

Je dédie ce travail à :
Mes très chers parents, pour leur sacrifice, ils n'ont jamais cessé de m'encourager.
Que Dieu me les garde.
A Mes frères et sœurs.
A mon binôme Sofiane pour sa précieuse aide et sa disponibilité

ADJEROUD Bilal

Remerciement

Nos sincères remerciements vont :

- à Gounounou Abd Rezak

Pour avoir accepté de présider ce jury ;

- à Feradji Fatima Zohra

Pour avoir accepté de faire partie du jury et d'examiner ce travail avec attention ;

Nous voudrions témoigner notre reconnaissance à notre promoteur,

Monsieur HATTI Mustapha

Pour nous avoir dirigé et orienté durant notre travail ainsi que pour sa disponibilité.

Nous tenons aussi à vraiment remercier nos parents, nos frères et sœurs.

Nos remerciements vont inévitablement aussi à nos enseignants et nos camarades de classe.

SOMMAIRE

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Nomenclature

Introduction generale 1

CHAPITRE I

Recherche bibliographique et etat de l'art 3

I. Introduction 3

II. Etat de l'art 4

III. Energie solaire photovoltaïque 6

1. Historique 6

2. Rayonnement solaire 8

3. Effet photovoltaïque et fonctionnement d'une cellule photovoltaïque..... 9

4. Les différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïque)..... 10

a. Les cellules monocristallines : 10

b. Les cellules poly cristallines : 10

c. Les cellules amorphes : 10

5. Générateur photovoltaïque 10

a. Paramètres du générateur photovoltaïques : 11

b. Les caractéristiques I-V et P-V d'un générateur photovoltaïque : 13

6. Ombrage et protection des panneaux photovoltaïques 16

7. Associations de panneaux photovoltaïques 17

8. Avantages et inconvénients d'une installation PV 18

IV. L'hydrogene 19

1. Historique 20

2. Mode de production d'hydrogène..... 21

a. Reformage du gaz naturel à la vapeur d'eau {vaporformage} 21

b. L'oxydation partielle : 21

c. Le reformage autotherme : 22

d. La gazéification : 22

e. L'électrolyse de l'eau : 22

3. Stockage d'hydrogène 23

a. Technologie de stockage d'hydrogène..... 24

b. Comparaison des différentes techniques de stockage 25

4. La pile à combustible..... 26

a. Principe de fonctionnement 26

| | | |
|---------------------|--|-----------|
| b. | Types de piles à combustible | 27 |
| c. | Intérêt d'utilisation des piles à combustible..... | 28 |
| V. | Conclusion | 30 |
| CHAPITRE II | | |
| | <i>Modélisation des composants du système PV/PAC.....</i> | 31 |
| I. | Introduction | 31 |
| II. | Description du système hybride PV-PAC | 31 |
| III. | Principaux composants | 31 |
| 1. | Panneaux photovoltaïques | 32 |
| a. | Modélisation d'un panneau photovoltaïque..... | 33 |
| b. | Poursuite du Point de Puissance Maximum (MPPT)..... | 35 |
| c. | Implémentation du générateur photovoltaïque sous Matlab/Simulink | 37 |
| d. | Performances du générateur photovoltaïque implémenté..... | 38 |
| 2. | Pile à combustible..... | 40 |
| a. | Modèle électrochimique de la pile à combustible PEMFC | 41 |
| b. | Modèle thermique de la pile à combustible | 45 |
| c. | Modèle électrique dynamique de la PEMFC | 46 |
| d. | Taux d'hydrogène consommé..... | 48 |
| e. | Implémentation de la pile à combustible sous Matlab/Simulink..... | 49 |
| f. | Résultats de simulation de la pile à combustible | 50 |
| 3. | L'électrolyseur..... | 51 |
| a. | Représentation chimique..... | 51 |
| b. | Modèle électrochimique..... | 52 |
| c. | Modèle thermique | 53 |
| d. | Taux d'hydrogène produit..... | 55 |
| e. | Implémentation du modèle d'électrolyseur dans Matlab/Simulink..... | 55 |
| f. | Performance du modèle de l'électrolyseur..... | 57 |
| 4. | Réservoir d'hydrogène | 57 |
| 5. | Convertisseurs électroniques | 58 |
| a. | Convertisseur DC-DC..... | 58 |
| b. | Convertisseur DC-AC | 59 |
| IV. | Méthode de gestion optimale de l'énergie..... | 59 |
| V. | Conclusion | 61 |
| CHAPITRE III | | |
| | <i>Simulation du systèmePV/PAC</i> | 63 |
| I. | Introduction | 63 |
| II. | Description du logiciel de simulation | 63 |

| | |
|--|-----------|
| III. Données d'entrée et de sortie du programme de simulation | 64 |
| 1. Données météorologiques et demande de charge de l'utilisateur | 64 |
| a. Données météorologiques | 65 |
| b. Données de demande de charge de l'utilisateur | 65 |
| 2. Paramètres des composants du système | 65 |
| 3. Données du système de sortie | 67 |
| IV. Hypothèses de simulation..... | 67 |
| V. Dimensionnement des composants du système PV/PaC | 68 |
| 1. Générateur PV | 68 |
| 2. Pile à combustible et l'électrolyseur..... | 69 |
| 3. Volume du réservoir de stockage | 69 |
| VI. Resultats de simulation | 70 |
| 1. 1 ^{er} scenario (solstice d'hiver)..... | 70 |
| 2. 2 ^{ème} scenario (solstice d'été)..... | 72 |
| VII. Analyse des resultats | 73 |
| 1. 1 ^{er} scenario (solstice d'hiver)..... | 73 |
| a. Le fonctionnement du système pendant l'intervalle [00h, 8h]..... | 74 |
| b. Le fonctionnement du système pendant l'intervalle [08h, 17h]..... | 74 |
| c. Le fonctionnement du système pendant l'intervalle [17h, 00h]..... | 75 |
| 2. 2 ^{ème} scenario (solstice d'été)..... | 76 |
| a. Le fonctionnement du système pendant l'intervalle [00h, 7h]... .. | 74 |
| b. Le fonctionnement du système pendant l'intervalle [07h, 18h]..... | 74 |
| c. Le fonctionnement du système pendant l'intervalle [18h, 00h]..... | 75 |
| VIII. Conclusion | 79 |
| <i>Conclusion générale et perspectives</i> | 80 |
| <i>annexe.....</i> | 81 |
| Schéma de simulation | 81 |
| 1. Panneau photovoltaïque..... | 81 |
| 2. Pile à combustible PEMFC..... | 82 |
| 3. Electrolyseur alcalin | 86 |
| 4. Réservoir d'hydrogène | 89 |
| 5. Système de gestion optimale de l'énergie | 89 |
| 6. Le convertisseur DC-DC | 90 |
| <i>Références bibliographiques :</i> | 90 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| Figure I.1: le spectre du rayonnement solaire. | 8 |
| Figure I.2 : principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque. | 9 |
| Figure I.3: cellules photovoltaïque (a)monocristallines/ (b) poly cristallin/ (c) amorphe..... | 10 |
| Figure I.4: caractéristiques $I-V$ et $P-V$ d'un générateur PV | 13 |
| Figure I.5: caractéristiques $I_{pv}-V_{pv}$ et $P_{pv}-V_{pv}$ sous l'influence de ; (a) et (b): l'éclairement a température fixe, (c) et (d): la température à éclairement fixe. | 14 |
| Figure I.6: association sécurisée de deux modules photovoltaïques en parallèle avec leurs diodes de protection. | 16 |
| Figure I.7: formes d'irrégularités possibles dans la caractéristique P_{pv} (V_{pv}) lors de conditions non uniformes d'insolation. | 17 |
| Figure I.8: association de panneaux PV ; (A) en série ; (B) en parallèle ; (C) mixte..... | 18 |
| Figure I.9 Différentes techniques sont utilisées pour produire de l'hydrogène. | 21 |
| Figure I.10 : l'électrolyse de l'eau | 23 |
| Figure I.11: réservoir cryogénique développé par magna Steyr | 24 |
| Figure I.12: stockage d'hydrogène sous forme solide. | 25 |
| Figure I.13 : Sir William Grove et son expérience. | 26 |
| Figure I.14 : fonctionnement d'une pile à combustible | 27 |
| Figure II.1 : concept du système PV/PAC | 32 |
| Figure II.2 : circuit équivalent à une diode d'une cellule PV | 33 |
| Figure II.3 Caractéristiques $V-I$ et $V-P$ d'un module PV | 35 |
| Figure II.4 : Organigramme de l'algorithme MPPT de la perturbation & observation | 37 |
| Figure II.5 : modélisation d'un panneau PV avec la commande MPPT sous Matlab/Simulink. | 38 |
| Figure II.6 : influence de l'éclairement et de la température sur les performances d'un panneau photovoltaïque..... | 40 |
| Figure II.7 : effet de la commande MPPT sur la puissance du panneau PV | 41 |
| Figure II.8 : courbe de polarisation d'une pile à combustible. | 43 |
| Figure II.9 : schéma électrique équivalent de la PAC | 47 |
| Figure II.10 : Modélisation de la PAC sous Matlab/Simulink..... | 50 |
| Figure II.11 : effet de la température sur : (a) caractéristique $V-I$ de la PAC , (b) caractéristique $P-I$ de la PAC | 51 |

| | |
|---|----|
| Figure II.12 : (a) profil de la température dans la pile à combustible en régime statique, (b) débit d'hydrogène consommé. | 51 |
| Figure II.13: la structure interne d'un électrolyseur alcalin..... | 52 |
| Figure II.14 : modélisation d'un électrolyseur sous Matlab/Simulink | 56 |
| Figure II.15 : influence de la température sur la caractéristique I-V de l'électrolyseur | 57 |
| Figure II.16 : la réponse en température du modèle d'électrolyseur implémenté | 57 |
| Figure II.17 : organigramme du principe de fonctionnement du système PV/PAC..... | 62 |
| Figure III.1 : données météorologique du solstice d'été..... | 65 |
| Figure III.2 : données météorologique du solstice d'hiver..... | 65 |
| Figure III.3 : profil de la charge. | 66 |
| Figure III.4 : réservoir de stockage d'hydrogène 60 bar 850l - 2 | 70 |
| Figure III.5 : modélisation du système PV/PAC sous Matlab/Simulink..... | 70 |
| Figure III.6 : les données météorologiques du solstice d'hiver. | 70 |
| Figure III.7 : production électrique du système PV/PAC | 70 |
| Figure III.8 : consommation électrique du système PV/PAC. | 71 |
| Figure III.9 : stratégie de gestion d'énergie dans le système PV/PAC. | 71 |
| Figure III.10 : Pression d'H ₂ dans le réservoir..... | 71 |
| Figure III.11 : quantité d'H ₂ dans le réservoir. | 71 |
| Figure III.12 : les données météorologiques du solstice d'été..... | 72 |
| Figure III.13 : production électrique du système PV/PAC | 72 |
| Figure III.14 : consommation électrique du système PV/PAC. | 72 |
| Figure III.15 : stratégie de gestion d'énergie dans le système PV/PAC | 72 |
| Figure III.16 : la perte de puissance dans le système PV/PAC. | 73 |
| Figure III.17 : Pression d'H ₂ dans le réservoir..... | 73 |
| Figure III.18 : quantité d'H ₂ dans le réservoir. | 73 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|---|----|
| Tableau I.1 : les différentes familles de piles à combustibles..... | 28 |
| Tableau I.2 : densités massiques d'énergie théoriquement récupérables pour différents combustibles..... | 29 |
| Tableau II.1 paramètres du module photovoltaïque..... | 38 |
| Tableau II.2 paramètres de la pile à combustible..... | 50 |
| Tableau II.3 paramètres électrique d'un électrolyseur alcalin [40]. | 56 |

NOMENCLATURE

| | |
|-------------|---|
| PV | Photovoltaïque |
| PAC | Pile à Combustible |
| GPV | Générateur photovoltaïque |
| $PEMFC$ | Pile à combustible du type PEMFC ; Proton Exchange Membrane |
| DC/DC | Convertisseur à courant continu |
| DC/AC | Onduleur |
| V_{pac} | Tension de sortie de la pile à combustible |
| P_{pac} | Puissance de sortie de la pile à combustible |
| P_{ch} | Puissance de la charge |
| H_2 | Molécule d'hydrogène |
| O_2 | Molécule d'Oxygène |
| H_2O | Molécule d'eau |
| V_{cell} | Tension de sortie de la cellule |
| I_{ph} | Photo-courant |
| I_s | Courant de saturation inverse de la diode |
| q | Constante de charge élémentaire (1.602.10 ⁻¹⁹ C) |
| K | Constante de Boltzmann (1.380.10 ⁻²³ J.K) |
| \emptyset | Flux incident |
| $NOCT$ | Température de fonctionnement nominale de la cellule |
| K_I | Coefficient de variation du courant en fonction de la température. |
| K_V | Coefficient de variation de la tension en fonction de la température. |
| $MPPT$ | Algorithme de poursuite de point de puissance maximale |
| INC | Méthode conductance incrémentale |
| $P\&O$ | Méthode de perturbation et observation |
| STC | Les conditions standard de test (Standard Test Conditions) |

| | |
|-------------------------|---|
| R_{ohm} | Résistance équivalente de la membrane à la conduction des protons |
| \dot{q}_{net} | Énergie nette |
| \dot{q}_{chem} | Énergie calorifique ou chimique |
| $\dot{q}_{sens+latent}$ | Énergie calorifique latente et sensible |
| \dot{q}_{perdue} | Pertes de chaleur |
| \dot{q}_{elec} | Énergies électrique |
| P_b | Pression du réservoir |
| P_{bi} | Pression initiale du réservoir |
| Z | Facteur de compressibilité en fonction de la pression |
| $LPSP$ | La probabilité de perte de charge pendant une période de temps considérée |
| M_{PAC} | Masse totale de la pile à combustible |
| C_{PAC} | Capacité thermique de la pile à combustible |
| h_{cond} | Paramètre de transfert de chaleur par conduction |
| h_{conv} | Paramètre de transfert de chaleur par convection |
| F | Constante de Faraday (96487 C/mol) |
| z | Nombre d'électrons participants à la réaction |
| R | Constante de gaz universelle (8.314 JK-1mol-1) |
| U | Facteur d'Utilisation |
| N_c | Nombre de cellule dans la pile à combustible |
| q_{H_2} | Débit d'hydrogène |
| ΔG | La variation de l'énergie libre de Gibbs |
| C_t | La capacité thermique globale de l'électrolyseur |
| VA_{HX} | Le coefficient de transfert de chaleur global |
| n_{H_2} | La quantité d'hydrogène stocker dans le réservoir (mol) |

INTRODUCTION GENERALE

Les sources d'énergie fossiles conventionnelles telles que le pétrole, le gaz naturel et le charbon, qui satisfont la plus grande partie de la demande d'énergie mondiale aujourd'hui, s'épuisent rapidement. En outre, leurs produits de combustion sont à l'origine de problèmes mondiaux tels que l'effet de serre et la pollution qui posent un grand danger pour notre environnement et finalement pour toute la vie sur notre planète. Les sources d'énergie renouvelables (solaire, éolienne, géothermique, etc.) attirent d'avantage l'attention en tant qu'énergie alternative. Parmi les sources d'énergie renouvelables, l'énergie photovoltaïque (PV) a été largement utilisée dans les applications de faible puissance. C'est également le candidat le plus prometteur pour la recherche et le développement pour les utilisateurs à grande échelle, car la fabrication de dispositifs PV à faible coût devient une réalité [1].

Les générateurs photovoltaïques présentent de nombreux avantages, tels qu'ils sont inépuisables et sans pollution, silencieux, sans pièces rotatives et avec une efficacité de conversion électrique indépendante de la taille. En raison de l'effet environnemental inoffensif des générateurs PV, ils remplacent les autres moyens polluants de production d'électricité. Avec la pénétration croissante des dispositifs solaires photovoltaïques, divers appareils anti-pollution peuvent être actionnés par l'énergie solaire PV ; par exemple, la purification de l'eau par traitement électrochimique ou le pompage PV d'eau dans les régions désertes.

D'un point de vue opérationnel, une production d'énergie photovoltaïque subit des grandes variations de sa puissance de sortie en raison des conditions météorologiques intermittentes. Ces phénomènes peuvent entraîner des problèmes de fonctionnement à la centrale, tels que des écarts de fréquence excessifs. Dans de nombreuses régions du monde, la nature fluctuante du rayonnement solaire signifie que les générateurs d'énergie purement PV destinés aux applications hors réseau doivent être volumineux et donc coûteux. Une méthode pour surmonter ce problème consiste à intégrer l'installation photovoltaïque avec d'autres sources d'énergie telles que le diesel, la pile à combustible (PAC) ou la batterie de secours [2].

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 [3].

L'alimentation électrique à pile à combustible est une option très attrayante à utiliser avec une source de production d'énergie intermittente telle que l'énergie photovoltaïque, car le système d'alimentation à pile à combustible est caractérisé par de nombreuses fonctionnalités attrayantes telles que l'efficacité, la réponse de charge rapide, la production modulaire et le carburant. Sa faisabilité en coordination avec un système PV a été réalisée avec succès pour les applications électriques connectées au réseau et autonomes. En raison de la capacité de réponse rapide du système d'alimentation à pile à combustible, un système hybride photovoltaïque-pile à combustible (PV/PAC) 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/PAC est possible de jour comme de nuit.

Les impacts environnementaux de la production d'énergie par pile à combustible sont relativement faibles par rapport aux autres sources d'énergie à combustibles fossiles. Étant donné que les réactions chimiques à l'intérieur de la pile à combustible sont accomplies par des catalyseurs, il nécessite un carburant à faible teneur en soufre. Les caractéristiques de faible émission du système d'alimentation à pile à combustible peuvent permettre à certains services publics de compenser les coûts d'installation d'équipements supplémentaires de contrôle des émissions. De plus, leur rendement élevé se traduit par de faibles émissions de CO₂ provenant des combustibles fossiles, ce qui contribuera à réduire le taux de réchauffement climatique. Par conséquent, le système d'alimentation à pile à combustible a un grand potentiel de coordination avec le générateur photovoltaïque pour lisser les fluctuations de l'énergie photovoltaïque.

L'objectif de l'étude est de parvenir à une conception qui optimise le fonctionnement d'un système hybride PV/PAC à hydrogène. Une méthode de gestion de l'énergie entre tous les composants de ce système a été sélectionnée pour un fonctionnement optimal du système complet.

CHAPITRE I

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE ET ETAT DE L'ART

I. INTRODUCTION

Il existe de nombreux sites isolés dans le monde, alimentés par des systèmes autonomes de génération d'électricité. Ces générateurs utilisent les sources renouvelables locales. On y trouve des panneaux photovoltaïques, des éoliennes et des micro-turbines. L'électricité provenant des sources renouvelables est intermittente, dépendante des conditions climatiques, donc ces générateurs renouvelables sont souvent couplés à un système de stockage assurant une disponibilité en continue d'énergie.

Le générateur renouvelable sélectionné pour notre étude est un champ photovoltaïque (PV).

Généralement, le stockage est assuré par des batteries. Ces systèmes, appelés systèmes PV/Batteries, sont actuellement une des solutions les plus utilisées. Les batteries ont de très bons rendements, de l'ordre de 80-85 %, et un prix très compétitif, si l'on considère la technologie plomb. Mais ses inconvénients sont nombreux :

- L'autodécharge peut atteindre 15 % par mois.
- Les contraintes de fonctionnement sont nombreuses afin d'éviter la dégradation prématurée des batteries :
 - a) Pas de charge/décharge trop profonde
 - b) Régime conseillé de charge/décharge
 - c) Sulfatation en cas de stockage prolongé
- La durée de vie est variable entre 6 mois et 15 ans selon la technologie et son utilisation.
- Un entretien régulier peut être nécessaire afin de maintenir un niveau suffisant d'électrolyte (cas des batteries ouvertes)
- En ce qui concerne la sécurité, un local ventilé doit être dédié aux batteries et la maintenance demande des précautions.

Les contraintes de fonctionnement décrites ci-dessus, imposent que la taille des batteries soit en regard de la puissance du générateur photovoltaïque, conduisant à une autonomie du système de stockage de 3 à 8 jours selon l'application. Du fait de ce stockage limité, pour qu'un tel système soit autonome, il doit être dimensionné par rapport au mois le plus défavorable. Par conséquent, l'excédent solaire produit lors des mois les plus favorables se trouve la plupart du temps mal valorisé.

Finalement, les systèmes PV-Batteries ne permettent d'alimenter qu'une charge limitée et seuls les appareils vitaux sont alimentés.

Pour améliorer ces systèmes PV-Batteries tout en conservant leur qualité de respect de l'environnement, une idée, apparue dans les années 90, est d'utiliser l'hydrogène pour stocker l'énergie à long terme. En effet, le gaz peut être produit par un électrolyseur, stocké sans perte importante quelle que soit la durée du stockage, puis converti en électricité dans une pile à combustible. Ces systèmes, appelés Solaire-Hydrogène ou PV-Hydrogène, présentent de nombreux avantages. Sans pièce en mouvement, l'électrolyseur et la pile à combustible ne produisent que très peu de bruit. De plus, on attend de ces composants une grande fiabilité, peu de contraintes de fonctionnement et une maintenance limitée. Cependant, l'utilisation de l'hydrogène comme stockage d'énergie augmente la complexité des installations. De nombreuses recherches ont été menées sur les systèmes Solaire-Hydrogène.

Dans ce chapitre, on présentera un état d'art de différentes études menées sur les systèmes PV-hydrogène, ainsi que quelques définitions relatives à ces systèmes.

II. ETAT DE L'ART

La pile à combustible et le photovoltaïque (PV) ont fait des progrès importants dans la génération d'énergie renouvelable. Cette combinaison fonctionne en alimentant l'électrolyseur par les modules photovoltaïques 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 de l'énergie et la rentabilité des systèmes hybrides basés sur PV-PAC ont fait l'objet de nombreuses recherches pour concevoir des micro-réseaux basés sur des systèmes d'énergie hybride PV-PAC.

Nous présentons ci-dessous quelques articles sur les micro-réseaux utilisant les générateurs solaires photovoltaïques et pile à combustible comme source énergétique :

- Dans [1], les auteurs ont présenté une étude de faisabilité en intégrant des piles à combustible dans des micro-réseaux autonomes ou connectées au réseau avec des panneaux photovoltaïques, pour répondre à la demande de charge et a supprimé le caractère intermittent de la production solaire.
- Dans [2], D.Rekioua et al, différents systèmes hybrides à pile à combustible sont présentés. Ensuite, une étude est donnée avec un générateur hybride « photovoltaïque/ pile à combustible» pour but de produire de l'électricité sans interruption dans les zones reculées.
- Le travail [3] a développé un modèle de simulation MATLAB d'un système hybride PV-PAC connecté au réseau.
- Dans [4] il y a un objectif de concevoir un système efficace de gestion d'énergie pour un système d'alimentation hybride « PV / pile à combustible / batterie », afin que la combinaison puisse être utilisée comme source d'alimentation fiable. Dans cet article, la structure du système d'alimentation hybride est décrite et les stratégies de commande pour la gestion de l'énergie de ce système sont discutées. Le système d'alimentation hybride proposé est ensuite vérifié par simulation numérique.
- Les chercheurs de travail [5] C.Ghenai, T.Salameh, A.Merabet , ont utilisé dans leur étude une analyse technico-économique basée sur une approche intégrée de modélisation, simulation et optimisation pour concevoir un système hybride solaire photovoltaïque / pile à combustible hors réseau, afin d'optimiser la conception et d'élaborer des stratégies de contrôle de la répartition du système autonome d'énergie renouvelable hybride pour répondre à la charge électrique souhaitée d'une communauté résidentielle située dans une région désertique.
- Dans [6] ;Kupecki et al. Ont introduit la technologie Power to Gas (PTG). Dans la méthodologie de la proposition, l'électricité dérivée du vent et du solaire est convertie à l'hydrogène à l'aide d'un électrolyseur à oxyde solide. Cet hydrogène peut être utilisé dans le réseau de gaz ou il peut être utilisé pour produire du méthane. Par conséquent, en couplant le réseau électrique et gazier, le déséquilibre des ressources peut être résolu et l'efficacité de l'ensemble du système est augmentée.
- dans le travail [7], MosayebBornapour et al, dans [7], parlent 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.

- Et dans [8], les auteurs parlent d'un autre algorithme, appelé **ABC (artificiel beecolony)**, qui est basé sur le comportement collaboratif entre les abeilles permettant de trouver la meilleure source de nourriture. Et des résultats obtenus lors de sa mise en œuvre dans un système autonome « un centre communautaire en Inde » utilisant des panneaux photovoltaïque, des piles à combustibles et un électrolyseur, pour évaluer sa rentabilité.
- Toujours dans le but de réaliser une gestion optimale d'un micro-réseau. L'article [9], propose un algorithme modifié **MBA** de l'algorithme chauve-souris pour réaliser la gestion optimale d'un micro- réseau comprenant des sources d'énergie renouvelables, en tenant compte des incertitudes causées par ces dernières, la demande de charge et le prix du marché. Les résultats obtenus sur le coût total de production ont été meilleurs et ils ont été obtenus en moins de temps de calcul par rapport à d'autres techniques. Par conséquent l'utilisation de cet algorithme modifié aboutit à de meilleures solutions et en moins de temps de simulation en comparaison avec d'autres méthodes du point de vue économique.
- Un article publié récemment [10], présente une manière de fusionner les informations immanente du côté charges et coté alimentation d'un micro réseau pour réaliser un système de contrôle hiérarchique qui favorise l'autoconsommation des énergies renouvelables pour satisfaire sa demande en électricité. Puis intègre ce système en se basant sur IoT (internet of things) dans un bâtiment intelligent « le laboratoire de l'Université d'Aalborg » au Danemark.

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-PAC.

III. ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

1. Historique

Au XIXe siècle, exactement en 1839, un physicien français nommé Alexandre Edmond Becquerel a découvert pour la première fois l'effet photovoltaïque. Edmond a constaté que certains matériaux pouvaient produire de petites quantités d'électricité quand ils étaient exposés à la lumière.

En 1905, Albert Einstein se pencha sur ce travail, il publia un papier sur le potentiel de production d'électricité à partir de la lumière du soleil. Ce document explore l'effet photovoltaïque, technologie sur laquelle est fondé le panneau solaire. En 1916 Robert Andrews Millikan confirme par ses travaux l'étude d'Einstein en étant le premier à produire de l'électricité à courant continu avec une cellule photovoltaïque. Tous les deux ont reçu le prix Nobel de physique pour leurs travaux. Pendant les quarante années suivantes, personne ne fit beaucoup de progrès en énergie solaire car les cellules photovoltaïques avaient un trop mauvais rendement pour transformer la lumière du soleil en énergie.

Le 25 avril 1954, les laboratoires Bell créaient la première cellule solaire en silicium d'une efficacité de 6%, et de ce fait le premier panneau photovoltaïque a été construit [12]. Il a été appelé batterie solaire mais c'était juste un effet d'annonce car il était trop coûteux à produire. Dans les années 1960 lors de la course à l'espace, l'industrie spatiale a investi beaucoup de fonds dans le développement des panneaux solaire, car les satellites ont besoin d'énergie sans combustible embarqué. L'espace était la première utilisation importante de la technique solaire. À partir des années 70 les gouvernements et les industriels investissent eux aussi dans la technique photovoltaïque pour faire face à la crise du pétrole [12].

En 1973, l'université de DELAWARE a construit la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques « Solar one » ; en 1990 les panneaux (qui regroupent plusieurs cellules) sont installés dans cette maison test. Enfin, à partir de 1995 les panneaux photovoltaïques sont mis en vente dans le commerce.

2. Rayonnement solaire

Le soleil, notre source d'énergie, est un astre de diamètre de 1.4 millions kilomètre et de 5770°k de température, tire son énergie des réactions thermonucléaire qui se produisent en permanence au niveau de son noyau, ou chaque seconde de façon irréversible 564 millions de tonnes d'hydrogène fusionnent avec 560 millions de tonnes d'hélium. Ces réactions thermonucléaires permettent au soleil d'envoyer dans toutes les directions de l'espace une quantité d'énergie énorme 3.87×10^{26} watt sous forme de rayonnement électromagnétique de longueur d'ondes variantes de 0.22 μm à 10 μm . Ce rayonnement solaire se propage à la vitesse de la lumière ; il lui faut donc, en moyenne, 499 secondes, soit 8 minutes et 19 secondes, pour atteindre notre atmosphère [13].

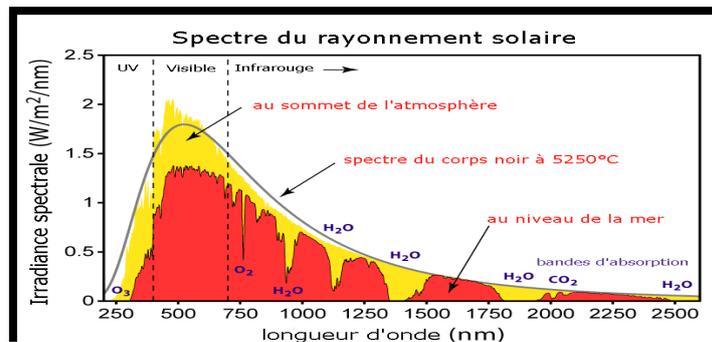


Figure 1.1: le spectre du rayonnement solaire.

L'énergie solaire reçue par unité de temps à la limite supérieure de l'atmosphère faisant face au soleil est appelée la constante solaire, et elle est estimée à 1367 w/m^2 par Claus Fröhlich et Christoph Wehrli du centre radiométrique de Davos (Suisse) [13]. Cette valeur n'est pas vraiment constante, elle varie selon que la terre s'éloigne ou se rapproche du Soleil dans sa rotation autour de ce dernier.

Lors de la traversée de l'atmosphère, ce rayonnement de 1367 w/m^2 diminue du fait de son absorption partielle par les gaz atmosphériques et la vapeur d'eau ou par sa diffusion par les aérosols. Ainsi le flux reçu sur terre est inférieur à sa valeur initiale et dépend de l'angle d'incidence, et donc de l'épaisseur atmosphérique traversée. Plus cette épaisseur est grande plus la puissance du rayonnement diminue.

La trajectoire parcourue par le rayonnement solaire dans l'atmosphère est appelé Masse atmosphérique ou AIR MASS, et notée AM.

Elle est définie par : $AM = \frac{1}{\sin h}$ (I-1) h : représente l'angle entre la position du soleil et horizon.

3. Effet photovoltaïque et fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque, aussi appelée cellule solaire, constitue l'élément de base de la conversion photovoltaïque.

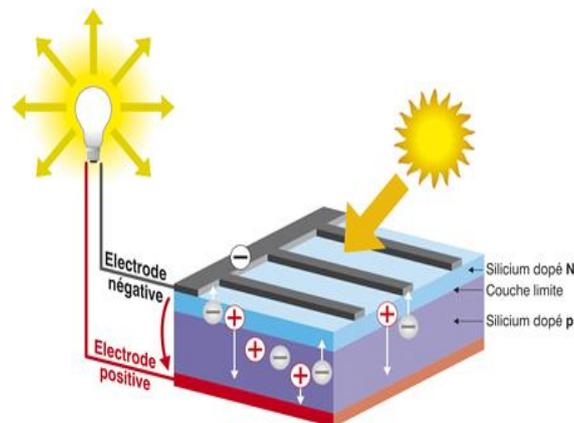


Figure I.2: principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

Il s'agit d'un dispositif semi-conducteur qui transforme en énergie électrique l'énergie lumineuse fournie par une source d'énergie inépuisable, le soleil. Elle exploite les propriétés des matériaux semi-conducteurs utilisés dans l'industrie de l'électronique : diodes, transistors et circuits intégrés.

L'effet photovoltaïque se manifeste quand un photon est absorbé dans un matériau composé de semi-conducteurs dopés p (positif) et n (négatif), dénommé comme jonction p-n (ou n-p). Sous l'effet de ce dopage, un champ électrique est présent dans le matériau de manière Permanente (comme un aimant possède un champ magnétique permanent).

Quand un photon incident (grain de lumière) interagit avec les électrons du matériau, il cède son énergie $E=h\nu$ (I-2) à l'électron qui se retrouve libéré de sa bande de valence et subit donc le champ électrique intrinsèque. Sous l'effet de ce champ, l'électron migre vers la face supérieure laissant place à un trou qui migre en direction inverse.

Des électrodes placées sur les faces supérieure et inférieure permettent de récolter les électrons et de leur faire réaliser un travail électrique pour rejoindre le trou de la face antérieure.

4. Les différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïques)

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par un rendement et un coût qui lui sont propres. Cependant, quel que soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8 et 23 % de l'énergie que les cellules reçoivent.

Actuellement, il existe trois principaux types de cellules :

a. Les cellules monocristallines :

Elles ont le meilleur rendement (de 12 à 18% voir jusqu'à 24% en laboratoire) cependant, elles coûtent trop chères dues à leur fabrication complexe.

b. Les cellules poly cristallines :

Leur conception est plus facile et leur coût de fabrication est moins important. Cependant leur rendement est plus faible (de 11% à 15% voir jusqu'à 19.8 en laboratoire).

c. Les cellules amorphes :

Elles ont un faible rendement (de 5% à 8% voir jusqu'à 13% en laboratoire), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres. L'avantage de ce dernier type est le fonctionnement avec un éclairage faible (même par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment).

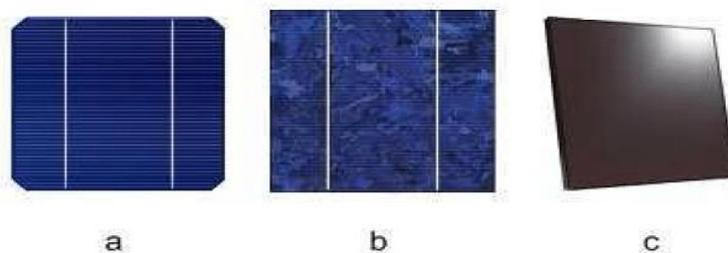


Figure 1.3: cellules photovoltaïques (a) monocristallines/ (b) poly cristallin/ (c) amorphe

5. Générateur photovoltaïque

Le terme générateur photovoltaïque GPV est utilisé pour désigner, selon l'application considérée, un module ou un panneau PV. Toutefois, il peut faire allusion au système PV tout entier.

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés, délivre au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension de jonction PN). Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un panneau photovoltaïque. En effet, les modules PV sont composés d'un ensemble de cellules mises en série, réalisant la conversion proprement dite de la lumière du soleil en électricité. Ils sont eux-mêmes associés en série et parallèle pour former un champ photovoltaïque d'une puissance crête définie selon des conditions spécifiques d'éclairement, de température et de spectre solaire.

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

- ✓ Protection des cellules contre les agents atmosphériques.
- ✓ Protection mécanique et support.
- ✓ Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur

a. Paramètres du générateur photovoltaïques :

❖ *Tension en circuit ouvert (V_{co}) :*

Exprimée en Volts, est la tension mesurée lorsqu'aucun courant ne circule dans la cellule. Elle dépend de la différence des travaux de sortie des électrodes et aussi de la différence entre le niveau HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital) du donneur et le niveau LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital) de l'accepteur. Elle varie peu avec l'éclairement solaire :

$$V_{CO} = V_t * \ln \left[\left(\frac{I_{cc}}{I_S} \right) + 1 \right] \dots \dots (I-3)$$

Ou V_t , I_{cc} et I_S sont respectivement la tension thermique, le courant de court-circuit et le courant de saturation de la cellule.

❖ **Courant de court-circuit (I_{cc}) :**

Exprimé en Ampère, il est le courant qui circule dans la cellule sous éclairage sans application de tension extérieure. Il est proportionnel à l'éclairage et dépend principalement de la mobilité des porteurs de charges. C'est l'intensité du courant la plus grande que peut fournir un générateur PV.

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), L'expression approchée du courant de court-circuit est :

$$I_{cc} = I_{ph} / \left[1 + \left(\frac{R_s}{R_p} \right) \right] \dots\dots(I-4)$$

I_{ph} est le courant photo-généré de la cellule, R_s est la résistance série qui tient compte des contacts face avant et arrière de la cellule et R_p la résistance parallèle qui rend compte des effets, tels que le courant de fuite par les bords de la cellule.

❖ **Point de puissance maximale P_{max} :**

L'utilisation optimale d'une photopile consiste à faire fonctionner une charge sous la tension maximale et à un courant maximal. En effet, suivant la formule $P=V.I$, pour que P soit maximale : il faut être dans les conditions où le produit V.I est maximale, c'est le point de charge idéal de la photopile, ou point de puissance maximale P_{max} .

❖ **Facteur de forme FF :**

C'est le rapport entre la puissance maximale que peut fournir une cellule et la puissance qu'il est théoriquement possible d'obtenir (puissance optimale):

$$FF = \frac{I_{max} \cdot V_{max}}{I_{cc} \cdot V_{co}} \dots\dots(I-5)$$

Le facteur de forme représente l'efficacité de la cellule, il peut nous renseigner sur le vieillissement de la cellule.

❖ **Rendement (η)**

C'est le rapport de la puissance maximale fournie (P_{max}) sur la puissance du rayonnement solaire incident (P_{inc}) :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{max} \cdot V_{max}}{\phi \cdot S} \dots\dots(I-6)$$

Avec :

P_{inc} : la puissance incidente sur la cellule.

V_{max} : Tension qui correspond à la puissance maximale (V).

I_{max} : Courant qui correspond à la puissance maximale (A).

S : Surface de la cellule solaire.

Φ : Flux incident.

b. Les caractéristiques I-V et P-V d'un générateur photovoltaïque :

Les caractéristiques I-V et P-V sont des courbes qui représentent respectivement le courant I débité par un générateur photovoltaïque et sa puissance en fonction de la tension aux ses bornes.

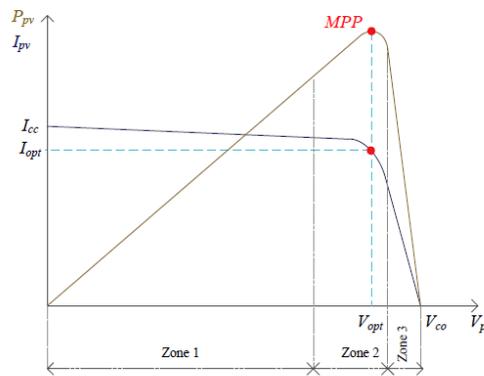


Figure I.4: caractéristiques I-V et P-V d'un générateur PV

La figure ci-dessous montre les caractéristiques courant-tension I_{pv} - V_{pv} et puissance-tension P_{pv} - V_{pv} d'un générateur photovoltaïque pour une température et un niveau d'ensoleillement donnés.

La figure ci-dessus montre que la caractéristique I-V d'un générateur PV se dévise en trois zones :

- a) **La zone (1):** courant reste constant quelle que soit la tension, le générateur PV fonctionne comme un générateur de courant.
- b) **La zone (2):** représente la région préférée pour le fonctionnement d'un générateur PV ou le point optimale.
- c) **La zone (3):** le générateur PV est assimilable à un générateur de tension.

Les conditions météorologiques ainsi que les demandes coté consommateur, rend complexe la possibilité d'un fonctionnement optimal. Remédier aux problèmes d'optimisation et de gestion des systèmes photovoltaïques, impose généralement un étage d'adaptation comprenant un ou plusieurs convertisseurs statiques ; contrôlés par des stratégies de poursuite en temps réel du point de fonctionnement à puissance maximale dites "MPPT" (*Maximum Power Point Tracking*).

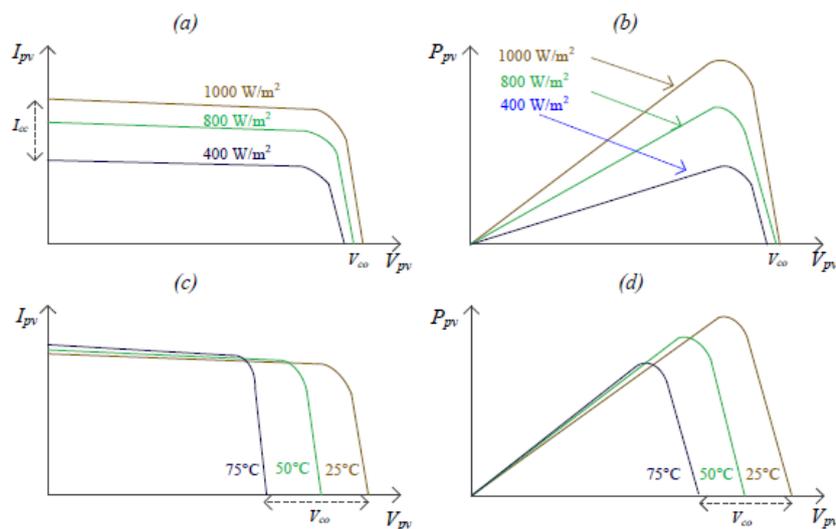


Figure I.5: caractéristiques I_{pv} - V_{pv} et P_{pv} - V_{pv} sous l'influence de ; (a) et (b): l'éclairement à température fixe, (c) et (d): la température à éclairement fixe.

Les caractéristiques tension-courant et puissance-tension varient sensiblement avec la température et sous divers éclaircissements. L'augmentation d'ensoleillement à température fixe, se traduit respectivement par une augmentation de courant photovoltaïque et de la puissance produite, figure I.5 (a) et (b). L'accroissement du courant de court-circuit I_{cc} est beaucoup plus important que celui de la tension à circuit ouvert V_{co} . Par ailleurs, une augmentation de la température à éclairement fixe, engendre une diminution de la tension de circuit ouvert de l'ordre de 2 à 2.5 mV/°C pour une cellule cristalline, ainsi qu'une légère augmentation de courant, figure I.5 (c) et (d)

En se référant à la figure I.5, il est évident qu'une hausse de l'éclairement et une baisse de la température favorisent l'exploitation des champs photovoltaïques. Cependant, ces deux conditions ne sont que rarement vérifiées simultanément dans l'année. En outre, sachant que l'éclairement est le paramètre prépondérant pour fonctionner en plein régime ; le peu de retour d'expérience, nous informe que le rendement d'une installation solaire même au Sahara n'est pas aussi élevé qu'attendu. À titre d'exemple, sous les conditions météorologiques proches des conditions STC ($1000 \text{ W/m}^2, 25 \text{ }^\circ\text{C}$) la température sur la surface des cellules peut atteindre une température moyenne de $80 \text{ }^\circ\text{C}$, donc leurs rendements va chuter de plus de 50% par rapport à sa valeur maximale.

6. Ombrage et protection des panneaux photovoltaïques

Le retour d'expérience de la filière solaire, montre que les contraintes technologiques et météorologiques se traduisent par une impuissance des installations photovoltaïques à extraire la totalité de la puissance disponible au sein des cellules. Technologiquement, on ne peut pas éviter l'hétérogénéité électrique des cellules. Ceci induit une production électrique en baisse, ce phénomène étant connu sous le nom de pertes par "miss match".

Malgré le fait que ces pertes entraînent une baisse de la puissance produite comprises entre 1% et 10%, elles diminuent la rentabilité des générateurs solaires et augmente la durée d'amortissement de l'investissement. Un autre problème contraignant pour l'exploitation des champs photovoltaïques, est celui de l'ombrage partiel. En effet, le photovoltaïque réagit de manière très sensible aux phénomènes d'ombrages. Le rendement baisse fortement au-delà d'un certain pourcentage de la surface ombrée. Le facteur d'impact de l'ombrage (Shade Impact Factor (SIF)), peut être calculé comme suit [14] :

$$SIF = \left[1 - \frac{P_{ombre}}{P_{sys}} \right] \times \frac{A_{sys}}{A_{ombre}} \dots\dots(I-7)$$

Où A_{sys} et A_{ombre} représentent respectivement la surface totale du champ photovoltaïque et la surface ombrée. P_{sys} Et P_{ombre} sont respectivement la puissance nominale et la puissance extraite sous l'effet d'ombrage.

En conséquence, les panneaux photovoltaïques doivent être protégés contre les effets destructifs de tels phénomènes par des diodes. Ils sont dotés de deux types de protection,

- Diode by-pass en cas de connexion série, pour faire face aux tensions inverses qui provoquent des échauffements, figure I.6 ;
- Diode anti retour en cas de connexion en parallèle pour éviter le retour de courant (courants négatifs).

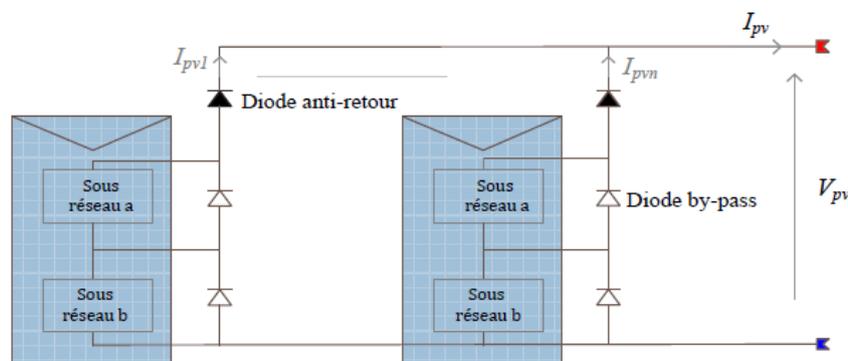


Figure I.6: association sécurisée de deux modules photovoltaïques en parallèle avec leurs diodes de protection.

Lors de l'enclenchement de ces dispositifs de sécurité, des irrégularités typiques apparaissent dans les caractéristiques (Vp) du générateur photovoltaïque, figure I.7. Cette figure reflète l'ampleur du déficit en puissance que peut provoquer un ombrage ainsi que la possibilité d'apparition de plusieurs maxima locaux de puissance. Face à de tel cas de figure, les algorithmes MPPT classiques sont automatiquement mis en échec. En effet, ils sont conceptuellement dédiés à la recherche d'un maximum de puissance pour des conditions d'ensoleillement uniformes. Pour faire face à ce problème, de nombreux travaux ont été menés pour adapter les algorithmes MPPT.

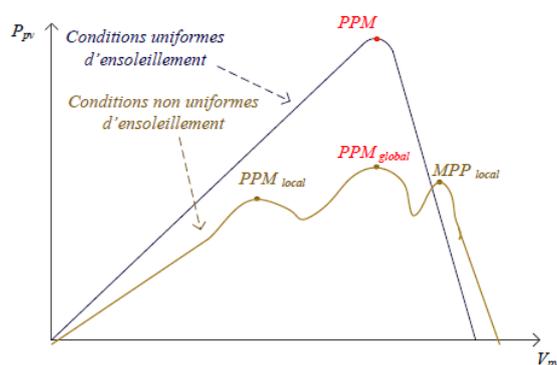


Figure I.7: formes d'irrégularités possibles dans la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ lors de conditions non uniformes d'insolation.

7. Associations de panneaux photovoltaïques :

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de 0.6 Volt pour des cellules en silicium. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau). Généralement, le nombre de cellules d'un module PV standard est de 36 ou 72 cellules. Cependant, il peut varier en fonction des applications spécifiques. La connexion des panneaux photovoltaïques entre eux est généralement conditionnée par des contraintes liées à l'application envisagée, au niveau de puissance et à la qualité de l'énergie. Une connexion série permet d'avoir le niveau de tension voulu. Quant à la connexion parallèle, elle est essentielle pour atteindre le niveau de puissance requis.

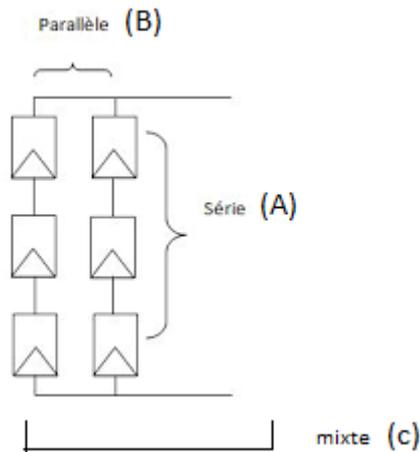


Figure I.8: association de panneaux PV ; (A) en série ; (B) en parallèle ; (C) mixte.

8. Avantages et inconvénients d'une installation PV :

L'énergie solaire présente, outre tous les avantages des énergies renouvelables, ses propres avantages, à savoir :

- Énergie maîtrisable et adaptable aux situations de toutes les régions.
- Le photovoltaïque est une technologie sûre et sans risque. En général, les panneaux photovoltaïques sont garantis 25 ans.
- Les systèmes PV sont simples et rapides à installer et les coûts d'exploitation et d'entretien des modules photovoltaïques sont considérés comme faibles, presque négligeables par rapport aux coûts des autres systèmes d'énergie renouvelable.
- Le solaire photovoltaïque ne comporte aucune pièce en mouvement, la production électrique est réalisée sans combustion ; il n'existe donc ni d'usure due aux mouvements, ni d'usure thermique comme pour les chaudières.
- Cette technologie utilisée dans l'aérospatiale a prouvé sa stabilité et sa fiabilité durant des dizaines d'années. Les systèmes sont conçus pour résister aux intempéries, au rayonnement UV et aux variations de température.
- Les installations photovoltaïques présentent un bilan énergétique positif. Les modules sont recyclables et la majorité des composants peut être réutilisée ou recyclée.
- Ce système produit de l'électricité sur place ; il peut donc être installé là où on en a besoin, sans être raccordé à un quelconque réseau.

- Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple, des installations éoliennes.

Comme dans toutes les sources d'énergie renouvelable, l'électricité solaire a des problèmes d'intermittence. Le soleil ne brille pas la nuit ainsi que pendant la journée lorsque le temps est nuageux ou pluvieux. Par conséquent, l'intermittence et l'imprévisibilité de l'énergie solaire rend les installations photovoltaïque moins fiables. Parmi les inconvénients :

- Les panneaux solaires coûtent excessivement cher, du fait de la haute technicité qu'ils requièrent.
- Tributaire des conditions météorologiques.
- Le rendement de conversion d'un module est très faible pour les panneaux à usage publique, en plus le rendement électrique diminue avec le temps.
- Les panneaux solaires nécessitent des équipements supplémentaires (onduleurs) pour convertir l'électricité directe en électricité alternative afin d'être utilisés sur le réseau électrique en électricité photovoltaïque.
- La production d'électricité ne se fait que le jour alors que la plus forte demande se fait la nuit.
- Les usines de production de cellules photovoltaïques émettent du Dioxyde de Carbone.

IV. L'HYDROGENE

Comme l'électricité, l'hydrogène est principalement un vecteur énergétique produit à partir d'une autre ressource. Actuellement, pour des raisons économiques, il est issu essentiellement du gaz naturel. Quelques sources naturelles d'hydrogène ont cependant été observées.

L'hydrogène est un gaz diatomique, il tient la première place dans la classification de Mendeleïev (tableau périodique des éléments), il possède la plus simple structure atomique (un proton dans son noyau et un électron dans son atome). Parmi ses caractéristiques, il est incolore, inodore, non toxique et plus léger que l'air, c'est un gaz très inflammable dans l'air : 4% à 74,5% (20°C et 1 atm), détone facilement et brûle avec une flamme peu visible.

Le nom hydrogène vient des deux mots : hydro = eau, et gène = générateur, donc le mot hydrogène signifie «générateur d'eau », c'est l'élément le plus abondant dans l'univers (Il compose 75% de la masse de toute la matière dans les étoiles et les galaxies.), c'est le carburant du soleil (chaque seconde de façon irréversible 564 million de tonnes d'hydrogène fusionnent avec 560 million de tonnes d'hélium).

Avec l'accroissement de la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables, la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau et son utilisation dans le cadre de la transition énergétique sont à l'étude. Utilisé à ce jour essentiellement dans la chimie ou le raffinage, l'hydrogène pourrait trouver d'autres applications comme celles d'assurer le stockage de l'électricité ou d'alimenter le secteur des transports.

1. Historique

1671 : Robert Boyle dissout des tournures de fer dans de l'acide chlorhydrique dilué et rapporte que les ' vapeurs ' dégagées sont hautement inflammables.

1766 : Le chimiste britannique Henry Cavendish parvient à isoler une étrange substance gazeuse qui en brûlant dans l'air, donne de l'eau : "L'Hydrogène".

1781 : Appelé jusqu'alors "gaz inflammable", ce gaz fut nommé "Hydrogène" en 1783 par le grand chimiste français Antoine Lavoisier qui effectue la synthèse de l'eau.

1782 : Les frères de Montgolfier gonflèrent des petits ballons avec de l'hydrogène pour les voir s'envoler. Le **1er décembre 1783**, Jacques Charles poursuivit ces travaux et découla avec un ballon gonflé à l'hydrogène et parcourut 35 Km.

1804 : Le français Louis Joseph Gay-Lussac et l'allemand Alexander Von Humboldt démontrent conjointement que l'eau est composée d'un volume d'oxygène pour deux volumes d'hydrogène.

1839 : L'anglais William R. Grove découvre le principe de la pile à combustible : il s'agit d'une réaction chimique entre l'hydrogène et l'oxygène avec production simultanée d'électricité, de chaleur et d'eau en utilisant des électrodes de platine poreux et de l'acide sulfurique comme électrolyte.

1898 : James Dewar produit pour la première fois de l'hydrogène liquide.

1900 : Le premier "Zeppelin" effectue son vol inaugural, rempli d'hydrogène.

1931 : Harold Urey découvre le deutérium.

1939 – 1953 : L'anglais Francis T. Bacon fait progresser les générateurs chimiques d'électricité qui permettent la réalisation du premier prototype industriel de puissance.

Au début des années **1950**, l'idée d'utiliser de l'hydrogène dans un réacteur pour la propulsion d'avion.

1960 : À partir de cette date, la NASA utilise la pile à combustible pour alimenter en électricité ses véhicules spatiaux (capsules Apollo et Gemini)

2. Mode de production d'hydrogène

Le dihydrogène est un vecteur énergétique car il doit être produit avant d'être consommé. Les techniques de production consistent à extraire le dihydrogène H₂ de la ressource primaire, tel que l'eau. Différentes techniques sont utilisées pour produire de l'hydrogène:

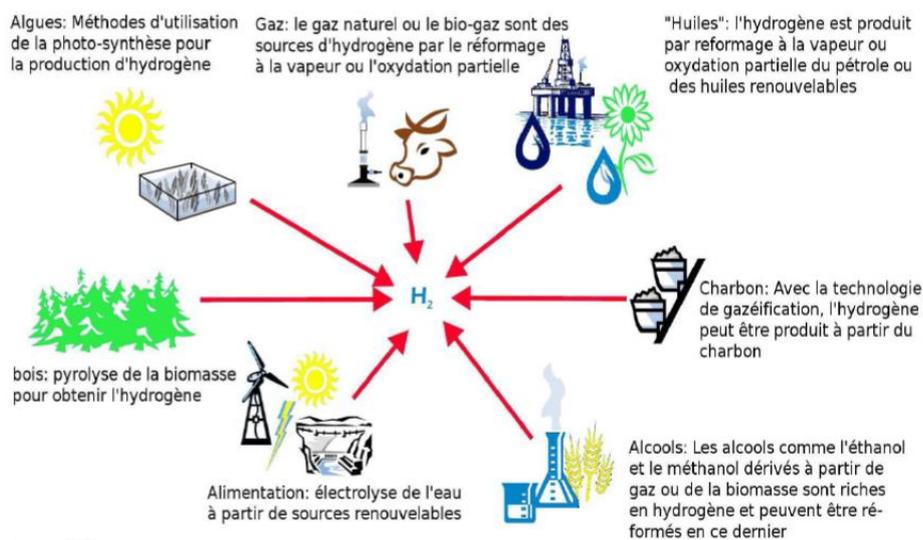


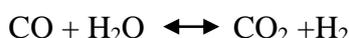
Figure I.9 Différentes techniques sont utilisées pour produire de l'hydrogène.

a. Reformage du gaz naturel à la vapeur d'eau {vaporformage}

Est la technique la plus répandue. Il s'agit de faire réagir du méthane avec de l'eau pour obtenir un mélange contenant de l'hydrogène et du CO₂. Cette transformation a lieu à haute température (840 à 950°C), à pression modérée (20 à 30 bars) et selon une réaction endothermique (nécessite un apport de chaleur) :



Le monoxyde de carbone produit dans la réaction réagit aussi avec l'eau selon l'équation suivante :

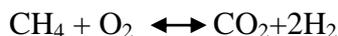
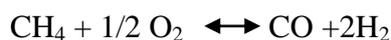


Le CO₂ émis par ce procédé pourrait éventuellement être capté et stocké pour produire de l'hydrogène. En lieu et à la place du gaz naturel, l'utilisation du bio méthane (méthane issu de la fermentation de la biomasse) constitue aussi une solution pour produire de l'hydrogène.

b. L'oxydation partielle :

On peut synthétiser l'hydrogène par l'oxydation des hydrocarbures en présence d'air ou d'oxygène pur, cette procédure appelée l'oxydation partielle qui est également un processus de production maîtriser.

Dans le cas du méthane l'oxydation partielle de ce dernier peut être décrite par les équations suivantes :



Ces types des réactions sont exothermiques et se déroulent (en général) sans catalyseur.

c. Le reformage autotherme :

Le reformage autotherme est une combinaison de l'oxydation partielle et du vaporeformage présentée dans les équations suivantes :



Ce procédé sert à compenser les réactions endothermiques du vaporformage par les réactions exothermiques de l'oxydation partielle. Dans ce procédé, le gaz naturel et l'oxygène sont mélangés en parallèle avec la vapeur d'eau avant d'être préchauffés. Ils sont ensuite dirigés vers le réacteur (catalyseur à base de nickel, pression de 20 à 60 bars et température de 900 à 1100°C) pour la production de gaz de synthèse. La composition typique du gaz obtenu est : 68% H₂, 20% CO, 10% CO₂, un peu de CH₄ et de N₂.

d. La gazéification :

Elle permet de produire, par combustion, un mélange de CO et d'H₂ à partir de charbon (solution qui émet beaucoup de CO₂. C'est un procédé ancien mis au point vers 1780.



e. L'électrolyse de l'eau :

Au tout début du XIX^e siècle, William Nicholson, un chimiste britannique, construisit une batterie électrique en se basant sur les travaux de Volta, et découvrit qu'en immergeant les extrémités des conducteurs électriques dans l'eau, cette dernière était décomposée en hydrogène (H₂) et oxygène (O₂) moléculaires. Avec cette découverte, Nicholson devint le premier homme dont l'histoire a conservé le nom, qui réussit à effectuer une réaction chimique à l'aide de l'électricité [31].

Donc l'hydrogène peut aussi être produit à partir d'eau et d'électricité, l'électrolyseur sépare une molécule d'eau en hydrogène et en oxygène. Cette voie est encore peu répandue car nettement plus coûteuse (2 à 3 fois plus chère que le reformage du gaz naturel) et réservée à des usages spécifiques qui requièrent un niveau élevé de pureté comme l'électronique.

L'électrolyse de l'eau est une réaction électrochimique de décomposition de l'eau en hydrogène et oxygène par l'application d'une différence de potentiel entre deux électrodes plongées dans un bain électrolytique, qui crée un champ électrique orienté dans lequel les ions

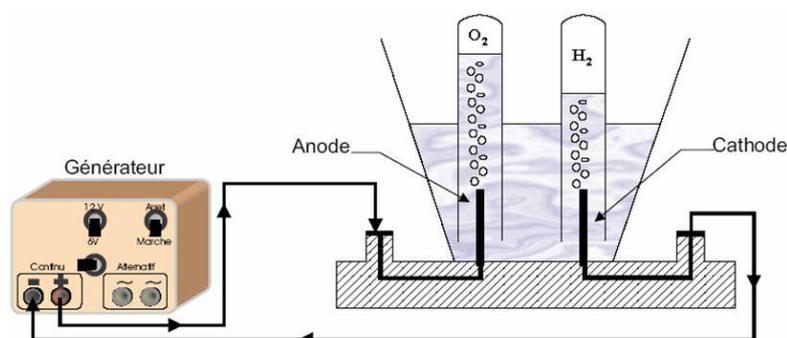


Figure I.10 : l'électrolyse de l'eau

se mettent en mouvement (les cations se dirigent vers la cathode et les anions vers l'anode)[32].

Quand la tension appliquée est suffisante, des réactions se produisent aux interfaces électrolyte électrodes :

À l'anode : oxydation avec émission d'électrons



À la cathode : réduction avec capture d'électrons



La réaction globale est :



3. Stockage d'hydrogène

Pour une autonomie de 400 km, une voiture équipée d'un moteur thermique a besoin de 24 kg d'essence. Avec une pile à combustible, il ne faudrait plus que 4 kg de dihydrogène. À condition ambiante l'hydrogène possède une masse volumique très faible (0.09 kg/m^3) ce qui implique des volumes de réservoir démesurés. En effet, pour ces 4 kg d'hydrogène, il faudrait un réservoir d'environ 45 m^3 dans les conditions normales de température et de pression. Il est alors intéressant de chercher à augmenter la densité de l'hydrogène afin de le stocker dans des volumes de réservoirs convenables.

a. Technologie de stockage d'hydrogène

Trois grandes familles se distinguent pour le stockage de l'hydrogène : les voies solide, liquide et gazeuse.

❖ Stockage sous forme gazeuse

La voie gazeuse est la plus simple et la plus répandue des technologies de stockage. L'hydrogène est contenu dans des réservoirs sous pression. Plus la pression est élevée, plus la quantité d'hydrogène stockée est grande. Les réservoirs actuellement développés fonctionnent avec des pressions maximales pouvant aller jusqu'à 700 bar.

Ainsi, à 700 bars, l'hydrogène possède une masse volumique de 42 kg/m³ contre 0.090 kg/m³ à pression et température normales. À cette pression, on peut stocker 5 kg d'hydrogène dans un réservoir de 125 litres.

❖ Stockage sous forme liquide

Une autre solution de stockage de l'hydrogène est la liquéfaction. Le passage de l'état gazeux à l'état liquide nécessite des conditions extrêmes de température (-253°C sous 1 bar de pression). L'avantage de l'hydrogène sous forme liquide est qu'il présente une plus grande capacité volumique.

En comparaison avec l'hydrogène comprimé à 700 bars qui présente une capacité volumique de 42 kg.m⁻³, l'hydrogène liquide possède une capacité massique de 70 kg.m⁻³.

Cependant le stockage sous forme liquide de l'hydrogène nécessite un réservoir ayant une parfaite isolation thermique ce qui est très difficile et coûteux à mettre en œuvre. Ainsi, une faible quantité d'hydrogène s'évapore constamment augmentant la pression au sein du réservoir. Pour éviter tout risque d'explosion, l'hydrogène doit alors être ventilé par une soupape, induisant une perte non négligeable au cours du temps.

Enfin, l'énergie requise pour liquéfier l'hydrogène consomme environ 30% du contenu énergétique du gaz. Cette forme de stockage est utilisée pour des applications très particulières comme la propulsion spatiale.

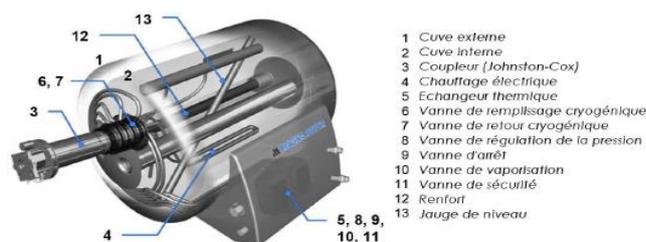


Figure I.11: réservoir cryogénique développé par magna Steyr

❖ *Stockage sous forme solide*

Contrairement à ce que son nom indique, le stockage solide de l'hydrogène ne fait pas intervenir la forme solide de ce dernier. L'hydrogène apparaît comme un « invité » chez un « hôte » qui est sous forme solide, c'est-à-dire conservé au sein d'un autre matériau.

Les méthodes de stockage de l'hydrogène sous forme solide sont des techniques mettant en jeu des mécanismes d'absorption ou d'adsorption de l'hydrogène par un matériau. Un exemple est la formation d'hydrures métalliques solides par réaction de l'hydrogène avec certains alliages métalliques. Cette absorption résulte la combinaison chimique réversible de l'hydrogène avec les atomes composant ces matériaux.



Figure I.9: stockage d'hydrogène sous forme solide.

Les matériaux parmi les plus prometteurs sont les composés à base de magnésium et les alanates. Seulement une faible masse d'hydrogène peut être stockée dans ces matériaux, c'est pour l'instant l'inconvénient de cette technologie. En effet, les meilleurs matériaux permettent à ce jour d'obtenir un rapport poids d'hydrogène au poids total du réservoir ne dépassant pas 2 à 3%.

Avant d'envisager des applications à grande échelle, il faut aussi maîtriser certains paramètres comme la cinétique, la température et la pression des cycles de charge et décharge de l'hydrogène dans ces matériaux.

b. Comparaison des différentes techniques de stockage

L'hydrogène est un gaz extrêmement léger et inflammable. Les consignes de sécurité mises en place par les différents pays sont très strictes. Les infrastructures de stockage d'hydrogène sous forme comprimé et liquéfié sont de moins en moins acceptées dans les environnements urbains. D'autre part, le stockage solide sous forme d'hydrures métalliques offre une capacité volumique beaucoup plus élevée que le gaz comprimé ou liquide permettant de stocker plus d'hydrogène pour un volume équivalent. Cependant le coût d'un réservoir utilisant les hydrures métalliques reste très élevé dû au prix de vente des matériaux mis en œuvre.

4. La pile à combustible

Le principe de la pile à combustible n'est pas nouveau, il a été mis en évidence il y a plus de 150 ans par deux chercheurs, Christian Friedrich Schönbein et Sir William Grove, Elle utilise de l'hydrogène et d'oxygène, fonctionne à basse température, possède des électrodes de platine et emploie de l'acide sulfurique comme électrolyte.

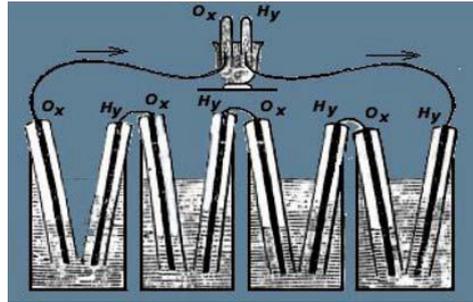
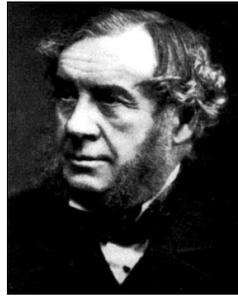


Figure I.13 : Sir William Grove et son expérience.

La première pile à combustible a été réalisée à la fin du 19^{ème} siècle et donnait une puissance de 1,5kW. C'est avec les travaux de Francis T. Bacon, dans les années 1930, que l'intérêt pour la pile à combustible est relancé. Celui-ci remplace l'électrolyte acide par un électrolyte alcalin.

L'amélioration des rendements et de la durée de vie de la pile qui en découle permet son utilisation dans des missions spatiales. Néanmoins, la technologie étant trop coûteuse, elle reste cloisonnée à des marchés de niche et est délaissée par l'industrie.

L'émergence des problématiques écologiques et l'engouement du secteur automobile au début des années 1990 relance la recherche pour cette technologie. Dès lors, plusieurs types d'électrolytes sont testés et utilisés dans différents prototypes. La nature de l'électrolyte détermine la température de fonctionnement de la pile, donc leur application industrielle, et le rendement du système.

a. Principe de fonctionnement

Une pile à combustible est un générateur d'électricité qui transforme directement l'énergie chimique d'un combustible en énergie électrique. Elle fonctionne selon le principe inverse de l'électrolyse de l'eau, puisqu'elle produit de l'électricité, de l'eau et de la chaleur à partir d'hydrogène et d'oxygène.

Le cœur d'une PAC est constitué de trois éléments, dont deux électrodes : une anode oxydante (émettrice d'électrons); une cathode réductrice (collectrice d'électrons) séparées par un électrolyte. L'électrolyte a la propriété de conduire directement d'une électrode à l'autre des molécules ionisées et de faire barrage aux électrons en les obligeant à passer par le circuit extérieur de la pile ou leur énergie électromotrice peut être exploitée. L'alimentation d'une PAC se fait par injection continue de combustible à l'anode, généralement de l'hydrogène, et à la cathode, généralement le dioxygène de l'air ou l'air lui-même. Une énergie électrique continue est alors disponible aux bornes de la pile.

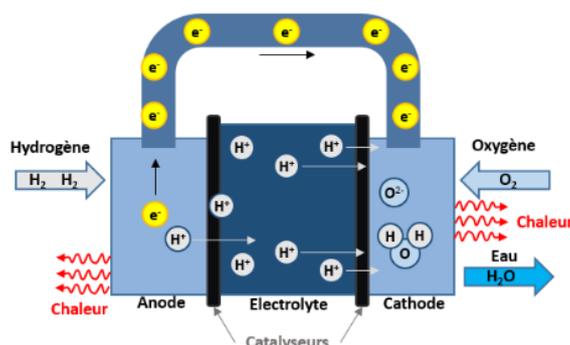
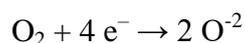


Figure I.14 : fonctionnement d'une pile à combustible

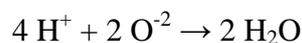
Au niveau de l'anode, la molécule d'hydrogène, au contact d'un catalyseur, se décompose et libère des électrons qui vont créer le courant électrique. C'est l'oxydation.



D'autre part, au niveau de la cathode, l'oxygène, au contact avec les électrons libérés par la précédente réaction réagit. C'est la réduction.



Enfin, les protons hydrogène, lorsqu'ils arrivent à la cathode, se recombinent avec les ions d'oxygène et forment de l'eau.



Cependant, même si le principe est simple, sa mise en application reste plus complexe.

b. Types de piles à combustible

Les piles à combustibles sont répertoriées en fonction de leurs températures de fonctionnement, de leurs électrolytes et de leurs plages de puissance. Les principales technologies de pile à combustible sont regroupées en cinq catégories :

- Les piles à combustible à membrane échangeuse de protons (**PEMFC**, Proton Exchange Membrane Fuel Cell).

- Les piles à combustible à acide phosphorique (**PAFC**, Phosphoric Acid Fuel Cell).
- Les piles à combustible à carbonates fondus (**MCFC**, Molten Carbonate Fuel Cell).
- Les piles à combustible alcalines (**AFC**, Alkaline Fuel Cell).
- Les piles à combustible à oxyde solide (**SOFC**, Solid Oxide Fuel Cell).

Tableau L1: les différentes familles de piles à combustibles.

| Type | Électrolyte | Anode | Cathode | Température de fonctionnement | Domaine d'utilisation |
|--------------|----------------------------------|--------------|--|-------------------------------|-----------------------------------|
| PEMFC | Polymère (solide) | Pt (platine) | Pt (platine) | 25°C à 100°C | Portable, transport, stationnaire |
| PAFC | Acide phosphorique (liquide) | Pt (platine) | Pt (platine) | 180°C - 200°C | Transport, stationnaire |
| MCFC | Sels fondus (liquide) | Ni (nickel) | Ni-LiO | 650°C | Stationnaire |
| AFC | Hydroxyde de potassium (liquide) | Ni (Nickel) | C (charbon) | 60°C a 90°C | Transport, portable |
| SOFC | Céramique (solide) | Ni-YSZ | La _x Sr _{1-x} MnO ₃ | 600°C a 1000°C | Stationnaire |

c. Intérêt d'utilisation des piles à combustible

Une pile à combustible, à la différence d'une pile classique dont on se débarrasse lorsque la matière active est épuisée, ou d'un accumulateur que l'on recharge électriquement, est alimentée en continu en combustible (H₂, alcool, ...) et en comburant (O₂, air,...). Cela lui confère une souplesse d'emploi équivalente à celle d'un moteur thermique (à essence par exemple). De plus, les électrodes en matériaux catalytiques (Pt, Ni, . . .), qui ne participent pas directement aux réactions électrochimiques, ne sont pas consommés (à la différence des piles classiques telles que la pile Leclanché, ou les piles au lithium). Cependant, la structure des électrodes peut évoluer par suite du frittage progressif des particules de catalyseur et de l'empoisonnement des sites actifs par des espèces poisons qui sont, soit contenues dans le combustible (CO, S, ...), soit produites par la réaction elle-même (CO issu de l'oxydation du méthanol notamment). Cela conduit dans tous les cas à une diminution de la surface réelle active : diminution de l'intensité du courant et de la puissance. La stabilité des électrodes peut être grandement améliorée par alliage avec un autre élément, ainsi que par un choix approprié du support conducteur.

Les avantages essentiels d'une pile à combustible, comparativement aux machines thermiques, se résument pour l'essentiel à :

- Un fonctionnement silencieux (peu d'organes en mouvement, si ce n'est des pompes de circulation), et non polluant (rejet d'eau pour la pile H₂/O₂).
- Une grande souplesse d'utilisation due, d'une part à une fabrication modulaire d'éléments de dimensions et de formes variées, et d'autre part à un démarrage et arrêt quasi-instantanés pour les piles à basse température (inférieure à 200°C),
- Un rendement énergétique élevé
- Enfin, une grande densité massique d'énergie, qui est un avantage particulièrement important à considérer pour des applications à l'espace ou à des véhicules électriques terrestres.

Les densités massiques d'énergie théoriquement récupérables pour différents combustibles sont :

Tableau I.2 : densités massiques d'énergie théoriquement récupérables pour différents combustibles.

| Combustible | Densité d'énergie (kWh/kg) |
|------------------------------|----------------------------|
| H2 comprimé a 700 bar | 34.1 |
| Essence | 13.1 |
| Charbon | 6.6 |
| Accumulateur lithium | 0.5 |

A côté de ces avantages indéniables, les piles à combustible présentent un certain nombre d'inconvénients, qui ont limité leur développement :

- L'électrolyse de l'eau, principale méthode de production de dihydrogène avec le vaporformage d'hydrocarbures, utilise plus d'électricité que le dihydrogène n'en produit lors de son utilisation dans la pile à combustible.
- Utilisation de métaux catalytiques précieux (Pt, Pd, Ag, ...) en quantité trop importante (3 à 4 g de Pt/kW pour une pile H₂/air de type PAFC), ce qui entraîne un coût exorbitant pour les applications civiles.
- La pile à combustible possède une durée de vie n'excédant pas quelques milliers d'heures. Pour qu'elle devienne rentable, il faudrait que cette espérance de vie augmente jusqu'à atteindre 20 000 à 40 000 heures

Le seul obstacle significatif restant celui du coût, il est possible d'espérer que les recherches en cours permettront d'atténuer, sinon de supprimer ce défaut.

V. CONCLUSION

Les thématiques développées au cours de ce chapitre visent à faire une introduction au travail qui suit. Pour cela, le chapitre a été subdivisé en deux parties. La première partie était consacrée aux générateurs photovoltaïques où nous avons rappelé quelques généralités liées au domaine photovoltaïque : effet photovoltaïque, caractéristiques, technologies, la production d'électricité, associations de panneaux photovoltaïques...etc. La deuxième partie était dédiée à l'hydrogène, vecteur énergétique, sa production, son stockage et son utilisation, ainsi qu'à la pile à combustible, son fonctionnement, ses types et l'intérêt de son utilisation.

CHAPITRE II

MODELISATION DES COMPOSANTS DU SYSTEME PV/PAC

I. INTRODUCTION

Les systèmes de production utilisant des sources d'énergie renouvelables nécessitent un mode de stockage d'énergie pour compenser les variations de puissance disponibles. Dans ce contexte, l'hydrogène a été choisi comme mode de stockage primaire pour les systèmes d'énergie renouvelable, ce qui rend ces systèmes hybrides très prometteurs pour l'avenir énergétique [26].

Ces systèmes sont destinés à être des solutions respectueuses de l'environnement car ils essaient de maximiser l'utilisation des sources d'énergie renouvelables sans nuire à l'environnement. Cependant, il n'est toujours pas en mesure de remplacer adéquatement l'énergie industrielle et domestique en raison de la nature intermittente de l'énergie solaire dans ces conditions de fonctionnement (température et rayonnement solaire) et du problème persistant de stockage d'énergie. Une méthode pour surmonter ces problèmes consiste à intégrer les systèmes photovoltaïques avec d'autres sources d'alimentation telles que la pile à combustible pour assurer un approvisionnement continu durant 24 heures malgré les conditions météorologiques. Ces systèmes sont appelés hybrides car ils combinent une source d'énergie renouvelable (photovoltaïque) et une autre utilisant de l'hydrogène.

Dans ce chapitre, on présente en première partie le système hybride PV-PAC ainsi que la modélisation de ces composants essentiels, puis en deuxième partie, on décrira une méthode de gestion optimale du système hybride proposé.

II. DESCRIPTION DU SYSTÈME HYBRIDE PV-PAC

Le système PV/PAC est composé d'un générateur solaire et d'un système de stockage d'énergie constitué d'un électrolyseur, d'une unité de stockage des gaz et d'une pile à combustible. Dans le système étudié (Figure II-1), le champ photovoltaïque (PV) 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 une utilisation ultérieure dans la pile à combustible (PEMFC), pour générer l'énergie électrique nécessaire à la charge lorsque le PV n'est pas en mesure de répondre aux exigences de la charge. Cette dernière produit de l'eau pure qui est stockée pour approvisionner l'électrolyseur.

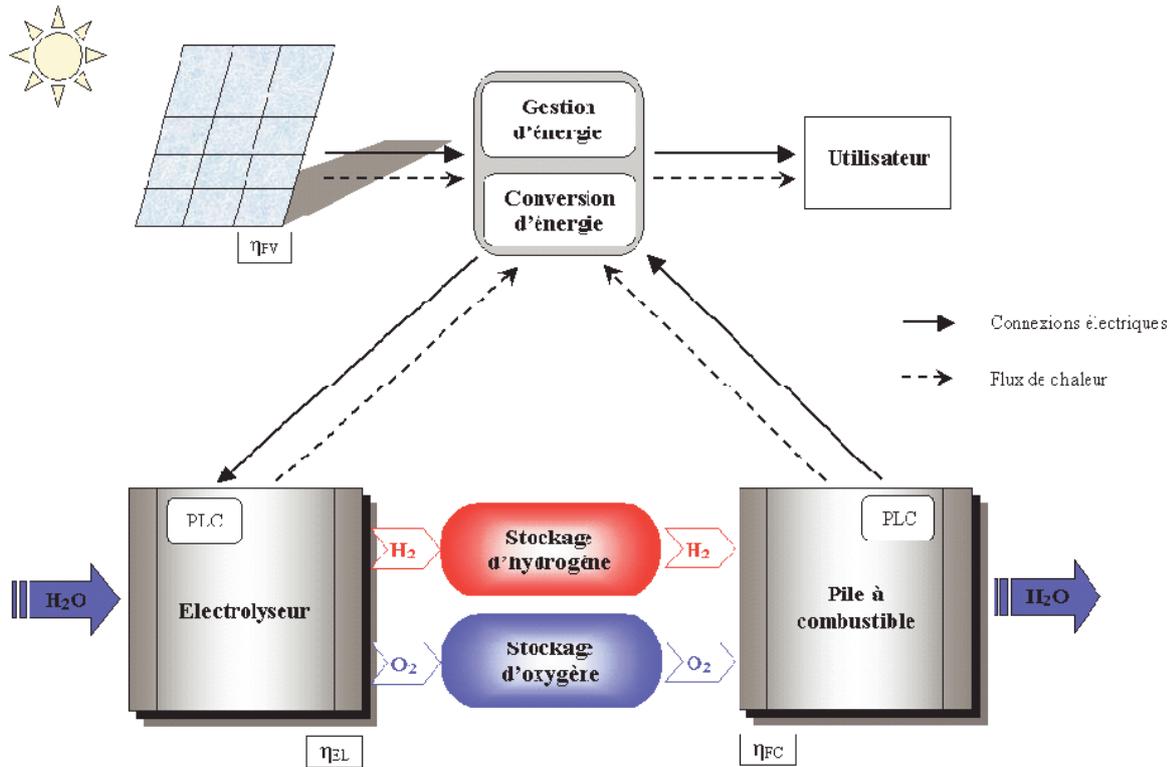


Figure II.1 : concept du système PV/PAC

Des convertisseurs DC en AC sont utilisés pour convertir la puissance de sortie des panneaux photovoltaïques et des piles à combustible en alimentation AC et répondre aux exigences des charges primaires de la maison.

III. PRINCIPAUX COMPOSANTS

Les principaux composants d'un système PV/PAC illustrés dans la figure II.1 ont été étudiés pour connaître leurs caractéristiques électriques, leurs paramètres et leurs performances.

1. Panneaux photovoltaïques

Un panneau PV est utilisé pour générer de l'énergie électrique en consommant la lumière du soleil. Cependant, il existe certains facteurs dont dépend la sortie d'un panneau PV comme la température et le rayonnement solaire.

a. Modélisation d'un panneau photovoltaïque

Afin d'étudier le fonctionnement d'un panneau photovoltaïque, son élément de base « la cellule photovoltaïque » peut être modélisé sur la base d'un circuit électrique. Actuellement, différents modèles de circuits électriques peuvent être utilisés pour la modélisation de la cellule PV en fonction du nombre de diodes (une diode, deux diodes...)[38].

Pour notre étude, nous utiliserons le modèle «une diode» qui offre un bon compromis entre simplicité et précision.

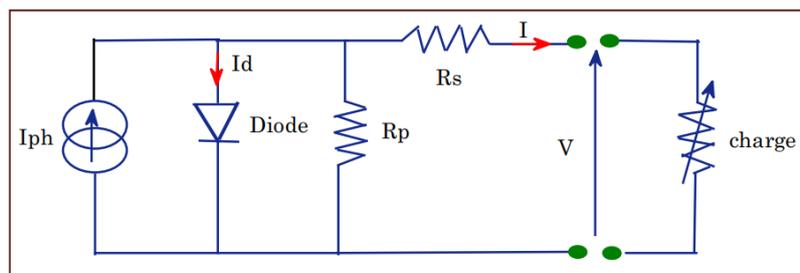


Figure II.2 : circuit équivalent à une diode d'une cellule PV

Dans le circuit équivalent à une diode, figure.II.2, la cellule photovoltaïque est représentée par une source de courant associée à une résistance en série, une autre en parallèle et une diode.

Les deux résistances, série R_s et parallèle (shunt) R_p tiennent compte des phénomènes dissipatifs au niveau de la cellule. La résistance série est due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts face avant et arrière. La résistance parallèle rend compte des effets, tels que le courant de fuite par les bords de la cellule, elle est réduite du fait de la pénétration des impuretés métalliques dans la jonction [15].

L'équation après plusieurs simplifications, reliant le courant délivré par un module PV constitué par la mise en série de N_s cellules et la tension à ses bornes est donnée par [15][38] :

$$I = I_{ph} - I_o \left(\exp \left(\frac{V + I \cdot R_s}{V_t} \right) - 1 \right) - \frac{(V + I \cdot R_s)}{R_p} \dots \dots (II-1)$$

Où : I_{ph} , I_0 et $V_t = N_s \cdot \frac{n \cdot k \cdot T}{q}$ désignent respectivement le photo-courant, le courant de saturation inverse de la diode et la tension thermique, avec : n le facteur d'idéalité de la diode, q la charge de l'électron, k la constante de Boltzmann, T la température de la cellule qui varie en fonction de l'éclairement et de la température ambiante (T_a), selon la relation linéaire :

$$T = T_a + \left(\frac{NOCT-20^\circ}{800} \right) \cdot G(t) \dots\dots(\text{II-2})$$

La performance de la cellule change par rapport à la température, comme indicateur standard, appelé NOCT, qui signifie température de fonctionnement nominale de la cellule. Le NOCT est la température de cellule d'un module lorsque la température ambiante est de 20°C, l'irradiation solaire est de 800 W/m² et la vitesse du vent est de 1 m/s.

Le photo courant I_{ph} varie selon la variation de la température et l'éclairement (G)

$$I_{ph} = [I_{ph,n} + K_I (T - T_n)] \frac{G}{G_n} \dots\dots(\text{II-3})$$

Le K_I , le coefficient de variation du courant en fonction de la température. $I_{ph,n}$ Est le photo-courant dans les conditions standard (à T=25 C et G=1000 w/m2), il est en relation linéaire en avec le courant de court-circuit I_{cc} et des résistances série R_s et parallèle R_p .

$$I_{ph,n} = I_{cc} \cdot \frac{R_p + R_s}{R_p} \dots\dots(\text{II-4})$$

Concernant le courant de saturation inverse de la diode I_0 , il peut être calculé comme suit [38][35]:

$$I_0 = \frac{I_{cc} + K_I (T - T_n)}{\exp\left(\frac{V_{co} + K_V (T - T_n)}{V_t}\right)} \dots\dots(\text{II-5})$$

Avec K_V le coefficient de variation de la tension en fonction de la température et V_{co} est la tension de court-circuit du panneau photovoltaïque dans les conditions standard.

La puissance générée par la cellule photovoltaïque s'obtient en multipliant l'expression précédente par la tension de sortie (V) et s'écrit comme :

$$P = V \cdot I_{ph} - V \cdot I_0 \left(\exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{V_t}\right) - 1 \right) - V \frac{(V + I \cdot R_s)}{R_p} \dots\dots(\text{II-6})$$

La puissance générée par tous les panneaux, P_{pv} , est calculé comme suit :

$$P_{pv} = N_{pv} \cdot P \dots\dots(\text{II-7})$$

Où N_{pv} est le nombre total de panneaux photovoltaïques, qui est une variable de décision.

À partir des équations étudiées ci-dessus, Les courbes représentant les caractéristiques $I = f(V)$ et $P = f(V)$ d'une cellule photovoltaïque peuvent être construites (figures.II.3).

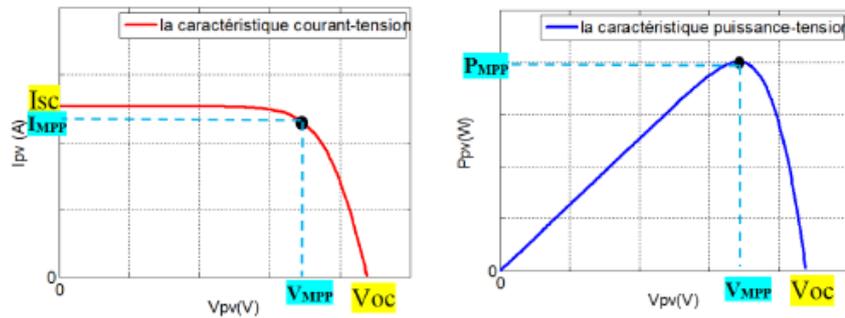


Figure II.3 Caractéristiques V-I et V-P d'un module PV.

Le suivi du point de puissance maximale (MPPT) des panneaux photovoltaïques est essentiel pour un fonctionnement optimal des systèmes PV. Grâce au MPPT, les panneaux photovoltaïques fonctionnent à leurs puissances maximales dans n'importe quelle condition de fonctionnement, à savoir la température et l'irradiation [16].

b. Poursuite du Point de Puissance Maximum (MPPT)

De nombreux algorithmes MPPT ont été proposés dans la littérature, parmi eux, deux sont souvent utilisés pour obtenir un suivi du point de puissance maximale : la méthode P&O et la méthode INC. La méthode INC (conductance incrémentale) offre de bonnes performances dans des conditions atmosphériques en évolution rapide. Cependant, quatre capteurs sont nécessaires pour effectuer les calculs. Alors que la méthode P&O (perturbation et observation) ne nécessite que deux capteurs, ce qui se traduit par une réduction des exigences matérielles et des coûts, si la vitesse d'exécution de la méthode P&O augmente, la perte du système diminuera. Par conséquent, la méthode P&O est utilisée pour contrôler le processus MPPT [17].

❖ *Méthode P&O*

La technique perturber et observer est une technique MPPT largement utilisée pour la production d'énergie solaire. Dans cette technique nous obtenons la tension et la puissance de sortie optimale, en comparant la puissance actuelle obtenue avec la puissance précédemment obtenue. Quand la puissance maximale est atteinte, nous avons obtenu le maximum power point. Cette technique est essentiellement et pratiquement une approche analytique «d'essais et d'erreurs». L'algorithme P&O fonctionne sur l'augmentation ou la diminution sporadique du courant de fonctionnement en comparant avec sa valeur précédente [18].

La figure II.4 montre l'organigramme de l'algorithme de la méthode **P&O**, tel qu'il doit être implémenté dans le microprocesseur de contrôle. D'après cet algorithme, la tension et le courant, sont mesurés pour calculer la puissance de sortie courante **P(k)** de la rangée. Cette valeur P(k) est comparée à la valeur P(k-1) de la dernière mesure. Si la puissance de sortie a augmenté, la perturbation continuera dans la même direction. Si la puissance a diminué depuis la dernière mesure, la perturbation de la tension de sortie sera renversée en direction opposée du dernier cycle, [19]. Dès que le MPP sera atteint, V oscillera autour de la tension de fonctionnement idéale V_{mpp} .

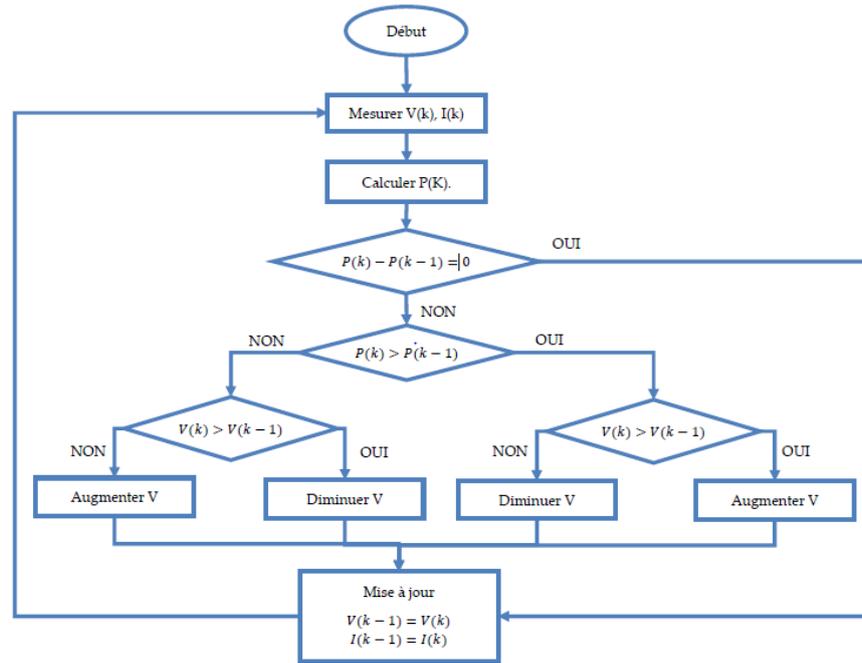


Figure II.4 : Organigramme de l’algorithme MPPT de la perturbation & observation

c. Implémentation du générateur photovoltaïque sous Matlab/Simulink

Basé sur les équations mathématiques discutées ci-dessus, le modèle dynamique du module photovoltaïque est développé sur de Matlab/Simulink. Le modèle est constitué par un panneau PV, une charge résistive et un convertisseur DC\DC commandé par un signal à modulation de largeur impulsion (MLI ou PWM) avec une stratégie de recherche du point de puissance maximal MPPT.

La Figure ci-dessous présente le schéma sous Matlab/Simulink d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT.

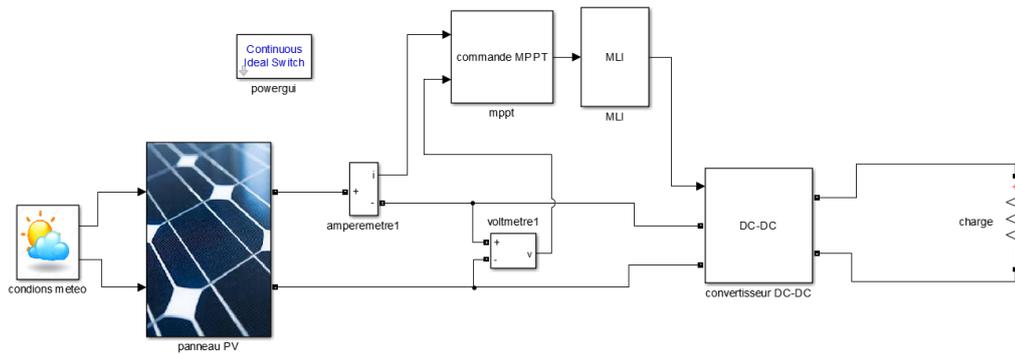


Figure II.5 : modélisation d'un panneau PV avec la commande MPPT sous Matlab/Simulink.

La commande MPPT détermine le rapport cyclique (entre 0 et 1) sur lequel est basé le signal MLI (modulation de la largeur d'impulsion), cette dernière attaque le convertisseur DC/DC pour ramener le panneau à fonctionner avec sa tension optimale, donc sa puissance maximale.

Les paramètres électriques du module photovoltaïque utilisé dans la simulation sont donnés en tableau II.1.

Tableau II.1 paramètres du module photovoltaïque

| Paramètre | Symbole | Valeur |
|------------------------------------|-----------|-----------------------|
| Puissance maximale | P_{max} | 250 Wc |
| Courant de court-circuit | I_{cc} | 8.63 A |
| Tension circuit ouvert | V_{co} | 37.4 V |
| Coefficient de température | k_I | 4.3 mA/ °C |
| | k_V | 135.0 mV/ °C |
| Résistance série | R_s | 0.4Ω |
| Résistance parallèle | R_p | 131 Ω |
| Factor idéalité de la diode | n | 0.95 |
| Nombre de cellules | N_s | 60 |
| Conditions STC | G_n | 1000 W/m ² |
| | T_n | 25°C |

d. Performances du générateur photovoltaïque implémenté

Pour l'analyse du fonctionnement du panneau PV choisi, en se basant sur le modèle étudié, une série de simulation ainsi que les résultats obtenus sont présentés sur les figures suivantes, tel que :

- La courbe (a) présente la caractéristique Courant-Tension du panneau PV pour différents éclairagements.
- La courbe (b) présente la caractéristique Puissance-Tension du panneau PV pour différents éclairagements.
- La courbe (c) présente la caractéristique Courant-Tension du panneau PV pour différents températures.
- La courbe (d) présente la caractéristique Puissance-Tension du panneau PV pour différents températures.

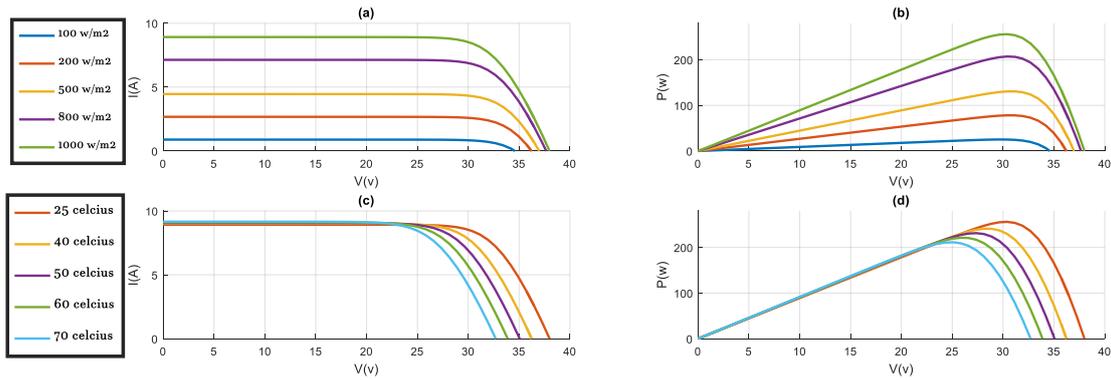


Figure II.6 : influence de l'éclairement et de la température sur les performances d'un panneau photovoltaïque

A partir de ces figures, il est observé que la variation de l'éclairement influe principalement sur le courant débité par le module, et la température influe sur la tension de sortie du module. En d'autres termes l'augmentation de l'éclairement fait augmenter le courant du module et par conséquent la puissance du module augmente. A l'opposé de l'éclairement solaire, l'augmentation de la température fait diminuer la puissance du module photovoltaïque en diminuant sa tension de sortie, et vice versa. On note qu'un panneau PV fonctionnant sous des conditions climatiques constantes, a un unique point de tension et de courant où sa puissance est maximale. La commande MPPT (Maximum Power Point Tracker), en français, le suiveur du point de puissance maximum peut être utilisé pour maintenir le point de fonctionnement du panneau photovoltaïque au point de sa puissance maximale. Le MPPT permet de réaliser ceci par le contrôle du courant et la tension du champ photovoltaïque, indépendamment des courants et tensions de la charge.

La figure II.7 montre la différence entre la puissance d'un panneau connecté directement à une charge de 100Ω et le même panneau PV connecté à un convertisseur utilisant la

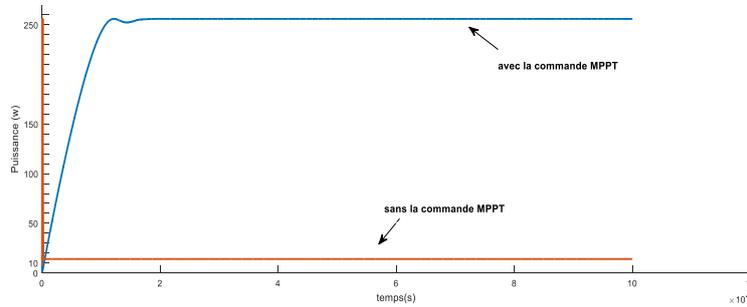


Figure II.7 : effet de la commande MPPT sur la puissance du panneau PV.

commande MPPT.

2. Pile à combustible

Les piles à combustible sont des dispositifs électrochimiques qui convertissent l'énergie chimique d'un combustible directement en électricité. Toutes les piles à combustible comprennent deux électrodes (anode et cathode) et un électrolyte (par exemple une membrane) qui sépare les électrodes. L'oxydation du carburant (principalement l'hydrogène) à l'anode produit des électrons qui sont guidés via un conducteur externe vers la cathode où ils réduisent l'oxydant et produisent de l'électricité. Une distinction importante entre les piles à combustible et les batteries secondaires est que, contrairement aux batteries, elles peuvent produire de l'énergie électrique tant que le carburant et l'oxydant sont fournis aux électrodes. Pour augmenter la basse tension d'une seule pile à combustible, de nombreuses piles sont connectées en série pour former un empilement de piles à combustible [27].

Actuellement, la technologie des PAC du type PEMFC est la principale candidate dans la technologie des piles à combustible grâce à sa haute densité de puissance et sa basse température de fonctionnement, résultant des temps de mise en œuvre relativement courts, mais restent long par rapport à la dynamique du module photovoltaïque [27].

a. Modèle électrochimique de la pile à combustible PEMFC

La pile à combustible prend de l'hydrogène et de l'oxygène pour former une réaction chimique, l'hydrogène se dissocie en protons et électrons. La réaction chimique est donnée comme suit :

$$\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}$$

Étant donné que l'hydrogène gazeux se dissocie en protons et électrons au niveau de l'anode, le gradient de concentration se développe entre les électrodes à travers la membrane. Ce gradient entraîne la diffusion de protons à travers la membrane et les électrons sont laissés pour compte. La dérive des protons vers la cathode entraîne une cathode chargée positivement par rapport à l'anode. Les électrons qui restent sont attirés vers la cathode chargée positivement ; mais comme ils ne peuvent pas passer à travers la membrane, ils trouvent donc une autre voie pour s'écouler de l'anode à la cathode et cette voie c'est le circuit extérieur.

Le voltage réel d'une pile à combustible est plus faible que le voltage théorique à la suite de la réaction, des pertes dues au transfert de charge et de masse. Comme le montre la figure II.8, la performance d'une pile à combustible peut être illustré Par une courbe de polarisation qui se compose de trois segments : 1) les pertes d'activation, 2) les pertes ohmiques, 3) les pertes de transfert de charges. Ainsi, la tension nominale d'une cellule peut se représenter comme l'écart entre la tension théorique et les pertes ci-dessus.

L'explication des termes de l'équation de la tension de la PAC ci-dessous provient de l'étude détaillée de différentes disciplines scientifiques. Le potentiel électrique ou voltage de Nernst (voltage thermodynamique théorique) provient de l'étude de la thermodynamique, les pertes d'activation sont décrites par l'électrochimie, le transport des charges définit les pertes ohmiques, et les pertes de concentration sont expliquées par le transfert de masses. Les pertes d'activation et de concentration se produisent aussi bien sur l'anode que sur la cathode, alors que les pertes ohmiques représentent les pertes résistives qui surviennent dans l'ensemble de

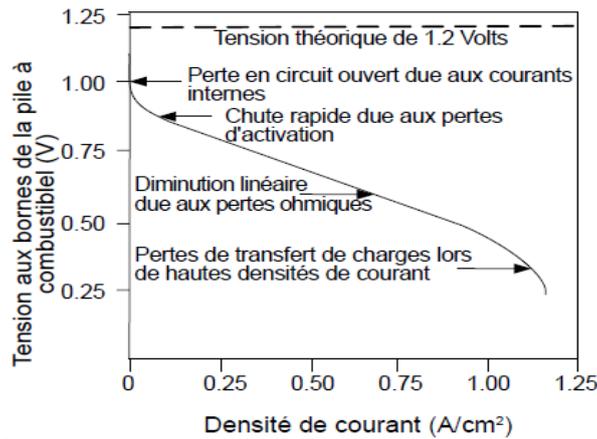


Figure II.8 : courbe de polarisation d'une pile à combustible.

la pile à combustible.

La tension de sortie de la pile à combustible, E_{PAC} , est le produit entre le nombre de cellules (N_c) composant la pile à combustible et la tension de sortie d'une seule cellule (E_{cell}).

$$E_{PAC} = N_c \cdot E_{Cell} \dots (II-8)$$

$$E_{Cell} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \dots (II-9)$$

Où V_{act} , V_{ohm} et V_{conc} sont respectivement les polarisations d'activation, ohmique et de concentration. Le potentiel électrique ou la tension maximale pouvant être générée par une cellule est donné par [10] :

$$E_{Nernst} = -\frac{\Delta G^\circ}{zF} + \frac{\Delta S}{zF}(T - T_0) + \frac{R \cdot T}{zF} \ln\left(\frac{P_{O_2}^{0.5} \cdot P_{H_2}^1}{P_{H_2O}^1}\right) \dots (II-10)$$

Où ΔG° est un travail électrique appelé énergie libre de Gibbs, z est le nombre d'électrons participants à la réaction, F est la constante de Faraday, ΔS est l'entropie spécifique, T est la température absolue opérationnelle, T_0 est pris comme 25°C et R est la constante universelle des gaz parfaits (8.314 J/K·mol). P_{O_2} , P_{H_2} , P_{H_2O} sont respectivement la pression d'oxygène pur, d'hydrogène et de H₂O.

L'expression de l'équation de Nernst arrangé avec un calcul numérique se présente comme suit :

$$E_{Nernst} = 1.229 - 0.85 \cdot 10^{-3}(T - 298.15) + 4.31 \cdot 10^{-5} \cdot T \cdot [\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2})] \dots \dots (II-11)$$

Les pressions partielles d'hydrogène et d'oxygène sont [30]:

$$P_{H_2} = 0.5 P_{H_2O}^{sat} \left[\exp \left(-\frac{1.635 \cdot I}{T^{1.334}} \right) \cdot \frac{P_{anode}}{P_{H_2O}^{sat}} - 1 \right] \dots \dots (II-12)$$

$$P_{O_2} = P_{H_2O}^{sat} \left[\exp \left(-\frac{4.192 \cdot I}{T^{1.334}} \right) \cdot \frac{P_{cathode}}{P_{H_2O}^{sat}} - 1 \right] \dots \dots (II-13)$$

La pression de saturation d'eau $P_{H_2O}^{sat}$ peut-être recalculée :

$$\log_{10} P_{H_2O}^{sat} = -2.18 + 2.95 \cdot 10^{-2} T_c - 9.18 \cdot 10^{-5} T_c^2 + 1.44 \cdot 10^{-7} T_c^3 \dots \dots (II-14)$$

$$\text{Avec } T_c = T - 273.15 \dots \dots (II-15)$$

T est exprimée en Kelvin, et P_{H_2} et P_{O_2} sont exprimées en bar. La valeur théorique de E_{Nernst} est environ 1,299 V, valeur qui n'est jamais atteinte même à vide [37].

❖ *Caractéristiques de polarisation d'une pile à combustible PEMFC*

Comme mentionné précédemment, on peut distinguer sur la courbe de polarisation de la pile PEMFC, qu'on appelle également courbes caractéristique V-I, trois domaines différents,

- Polarisation d'activation,
- Polarisation ohmique,
- Polarisation de concentration (transport de masse).

Et chaque polarisation est une chute de tension dominante dans une région particulière de densité de courant (faible, moyenne, ou élevée) [28].

➤ *Polarisation d'activation*

La chute de tension d'activation est provoquée par une réaction d'électrode lente. En d'autres termes c'est l'énergie nécessaire pour activer les réactions chimiques [20]. L'équation de Tafel, donnée ci-dessous, est utilisée pour calculer la chute de tension d'activation [25] :

$$V_{act} = \frac{R \cdot T}{\alpha z F} \ln \left(\frac{I}{I_0} \right) = T \cdot [a + b \ln(I)] \dots \dots (II-16)$$

D'autre part, une équation empirique pour η_{act} est donnée en [33], où une constante a_0 est ajoutée comme suit à l'équation précédente :

$$V_{act} = a_0 + (T - T_0)a + bT \ln(I) = V_{act1} + V_{act2} \dots (II-17)$$

Avec a, a_0 et b des constantes empiriques, $V_{act1} = a_0 + (T - T_0)a$ la chute de tension affectée uniquement par la température interne de la pile à combustible et $V_{act2} = bT \ln(I)$ est la chute de tension qui dépend à la fois du courant et de la température.

➤ **Polarisation ohmique**

Ce phénomène est proportionnel au courant, il est lié aux résistances électroniques des différents composants de la PAC, diminuant la tension entre les deux électrodes. Cette chute de tension se détermine principalement par la résistivité de la membrane polymère au transfert de protons, qui est supérieure à toutes les autres. En effet, il s'agit, dans la membrane électrolyte polymère, d'une conduction ionique. Or, les ions ayant une mobilité bien plus faible que les électrons, la résistance de la membrane est bien plus grande. Cette résistance peut être réduite en réduisant l'épaisseur de la membrane et en améliorant sa conductivité ionique [21].

Ceci peut être exprimé par l'utilisation de la loi d'Ohm,

$$V_{ohm} = I \cdot R_{ohm} \dots (II-18)$$

R_{ohm} est la résistance équivalente de la membrane à la conduction des protons, elle est calculée en fonction du courant et de la température, relation suivante[25]:

$$R_{ohm} = R_{ohm0} + k_{RI}I - k_{RT}T \dots (II-19)$$

Où, R_{ohm0} est la partie constante de résistance ohmique, k_{RI} et k_{RT} sont des constantes empiriques.

➤ **Polarisation de concentration**

Sur des densités de courant élevées, la cinétique de diffusion des gaz à travers les électrodes devient un facteur limitant due aux gradients de concentration des réactifs, puisque à partir d'une certaine quantité de courant demandée, l'alimentation en molécules d'oxygène ne peut plus suivre, et la tension chute rapidement. Donc on observe une décroissance proportionnelle à la densité de courant [19]. Ces pertes sont données par la relation suivante [22] :

$$V_{conc} = -\frac{R \cdot T}{zF} \ln\left(1 - \frac{I}{I_{lim}}\right) \dots (II-20)$$

Où I_{lim} courant de limitation ou le courant maximal, z est le nombre d'électrons participants à la réaction.

❖ *Potentiel réel global*

La relation de tension de sortie d'une cellule dans une pile à combustible peut donc s'exprimer selon cette relation

$$E_{Cell} = E_{Nernst} - a_0 - (T - T_0)a - b T \ln(I) - I \cdot R_{ohm} + b T \ln\left(1 - \frac{I}{I_{lim}}\right) \dots \dots (II-21)$$

Cette équation représente le comportement électrochimique statique de la pile à combustible.

b. Modèle thermique de la pile à combustible

Ce modèle calcule la chaleur nette générée par la réaction chimique à l'intérieur de la pile à combustible, qui fait monter ou descendre sa température, comme indiqué dans l'équation suivante [33][29] :

$$\dot{q}_{net} = \dot{q}_{chem} - \dot{q}_{elec} - \dot{q}_{sens+latent} - \dot{q}_{perdue} \dots \dots (II-22)$$

Où \dot{q}_{chem} représente l'énergie calorifique ou chimique, \dot{q}_{elec} est l'énergie électrique, $\dot{q}_{sens+latent}$ correspond à l'énergie calorifique latente et sensible, également appelée chaleur de transformation et énergie potentielle sous forme d'énergie thermique, et \dot{q}_{perdue} représente les pertes de chaleur ; tous exprimés en joules.

L'énergie libérée par réaction chimique est calculée par

$$\dot{q}_{chem} = \Delta G \cdot \dot{\eta}_{H_2,c} \dots \dots (II-23)$$

Avec $\dot{\eta}_{H_2,c}$ le débit molaire d'hydrogène consommé, et ΔG l'énergie libre de Gibbs.

L'énergie électrique est calculée comme suit :

$$\dot{q}_{elec} = V_{PAC} \cdot I_{PAC} \dots \dots (II-24)$$

La chaleur sensible et latente absorbée pendant le processus peut être estimée par l'équation suivante :

$$\dot{q}_{sens+latent} = (\dot{q}_{H_2,c} \cdot C_{H_2} + \dot{\eta}_{O_2,c} \cdot C_{O_2} + \dot{\eta}_{H_2O,g} \cdot C_{H_2O,l})(T - T_{amb}) + \dot{\eta}_{H_2O,g} \cdot H_v \dots \dots (II-25)$$

$C_{H_2}, C_{O_2}, C_{H_2O,l}$ sont des capacités calorifiques spécifiques en [J/mol.K], H_v est la vaporisation thermique de H₂O en [J/mol], $\dot{\eta}_{H_2O,g}$ est le débit molaire généré de H₂O en [mol/s], et $\dot{\eta}_{O_2,c}$ est le débit molaire d'oxygène consommé.

Et finalement, la perte de chaleur, qui est principalement transférée par convection d'air, peut être estimée par la formule suivante :

$$\dot{q}_{perdue} = h \cdot A \cdot N_s \cdot (T - T_{amb}) \dots \dots (II-26)$$

Avec étant h le coefficient de transfert de chaleur par convection en $[\text{W}/\text{m}^2.\text{K}]$, A la surface de chaque cellule dans $[\text{m}^2]$ et N_s est le nombre de cellule dans la pile a combustible.

En régime permanent $\dot{q}_{net} = 0$, la pile à combustible fonctionne à température constante. Pendant le régime transitoire, la température dans la pile à combustible varie selon l'expression suivante :

$$M_{PAC} C_{PAC} \frac{dT}{dt} = \dot{q}_{net} \dots \dots (\text{II-27})$$

Où M_{PAC} est la masse totale de la pile à combustible et C_{PAC} sa capacité thermique.

c. Modelé électrique dynamique de la PEMFC

Dans une pile à combustible PEM, un phénomène connu sous le nom de "double couche chargée" est observé. Les électrons à l'anode traversent la charge externe et arrivent à la cathode, où les ions d'hydrogène arriveront en même temps. En conséquence, deux couches chargées de polarité opposée sont formées à travers la frontière entre la cathode et la membrane. Cette couche peut ainsi être considérée comme un condensateur électrique. La collecte des charges développe une électricité qui correspond à la tension d'activation et à la tension de concentration comme discuté ci-dessus. Ainsi, il y a un certain temps après lequel les tensions d'activation et de concentration permettent au courant de passer. Mais la chute de tension ohmique correspond instantanément à la variation de courant [23]. Ce comportement peut être décrit par un modèle de circuit électrique équivalent comme le montre la figure II.9

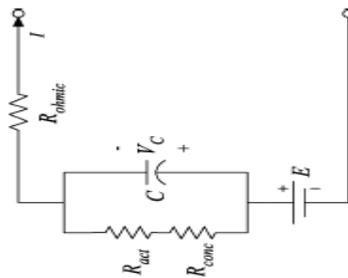


Figure II.9 : schéma électrique équivalent de la PAC.

Considérant V_C comme la tension dynamique aux bornes de la capacité électrique équivalente, C , l'équation de tension de la cellule peut s'écrire en utilisant les annotations de la figure II.9 comme :

$$V_{PAC} = E_{Nernst} - V_C - V_{ohmic} \dots (II-28)$$

$$\frac{dV_C}{dt} = \frac{1}{C} i_{FC} - \frac{1}{\tau} V_C \dots (II-29)$$

Où τ est la constante de temps pour le circuit RC donnée par :

$$\tau = C(R_{act} + R_{conc}) \dots (II-30)$$

L'effet de "double couche chargée" est intégré dans la modélisation, en utilisant V_C à la place de η_{act2} et η_{conc} , pour calculer la tension de sortie de la pile à combustible qui s'avère maintenant être

$$V_{PAC} = E_{Nernst} - V_{act1} - V_{ohm} - V_C \dots (II-31)$$

d. Taux d'hydrogène consommé

Le système de pile à combustible consomme de l'hydrogène venant du réservoir de stockage en fonction de la demande de puissance. Pendant les conditions de fonctionnement, pour contrôler le débit d'hydrogène en fonction de la puissance de sortie de la pile à combustible, une stratégie de rétroaction est utilisée [27].

La relation entre le débit molaire d'hydrogène requis, et le courant généré par la PAC est exprimée comme :

$$\dot{n}_{H_2,c} = \frac{N_s I}{2FU} \dots (II-32)$$

Où N_s est le nombre de cellules de la pile, F est la constante de Faraday (C/mol), I est le courant de la pile à combustible (A) et U est le facteur d'utilisation.

La relation entre le taux molaire de gaz à travers une valve et sa pression partielle peut être donnée par

$$\frac{q_{H_2}}{P_{H_2}} = K_{H_2} \dots (II-33)$$

Pour un débit molaire d'hydrogène, il existe trois facteurs importants : l'entrée, le débit de sortie et le débit ayant réagi. La relation entre ces facteurs peut être donnée par :

$$\frac{d}{dt} P_{H_2} = \frac{RT}{V_{ano}} (q_{H_2,in} - q_{H_2,out} - q_{H_2,r}) \dots (II-34)$$

Le débit d'hydrogène ayant réagi pour fournir de l'électricité, peut être exprimé comme

$$q_{H_2-r} = \frac{N_0 I}{2F} = 2K_r I \dots (\text{II-34})$$

$$\text{Où } K_r = \frac{N_0}{4F} \dots (\text{II-35})$$

A l'aide de la transformée de Laplace et des équations précédentes, on peut exprimer la pression partielle d'hydrogène par :

$$P_{H_2} = \frac{\frac{1}{K_{H_2}}}{1 + \tau_{H_2} p} (q_{H_2, in} - 2K_r I) \text{ Et } \tau_{H_2} = \frac{V_{ano}}{K_{H_2} RT} \dots (\text{II-36})$$

τ_{H_2} : est la valeur du temps de réponse en seconde du système associée au débit d'hydrogène, et K_{H_2} , la constante molaire de la valve d'hydrogène (mol/atm).

De la même manière, les pressions partielles d'oxygène et d'eau, sont exprimées comme suit :

$$P_{H_2O} = \frac{\frac{1}{K_{H_2O}}}{1 + \tau_{H_2O} p} 2K_r \dots (\text{II-37}) \text{ Et } \tau_{H_2O} = \frac{V_{ano}}{K_{H_2O} RT} \dots (\text{II-38})$$

$$P_{O_2} = \frac{\frac{1}{K_{O_2}}}{1 + \tau_{O_2} p} (q_{O_2, in} - K_r) \dots (\text{II-39}) \text{ Et } \tau_{O_2} = \frac{V_{cath}}{K_{O_2} RT} \dots (\text{II-40})$$

$$q_{O_2} = \frac{q_{H_2}}{r_{H-O}} \dots (\text{II-41})$$

$q_{O_2, in}$ est le débit molaire d'entrée d'oxygène. P_{O_2} , P_{H_2O} , sont les pressions partielles de l'oxygène et de l'eau.

e. Implémentation de la pile à combustible sous Matlab/Simulink

Les modèles décrivant le comportement statique et dynamique de la pile à combustible décrit précédemment ont été implémentés dans le logiciel MATLAB/Simulink dans le but de simuler ces performances électriques. Les résultats de la simulation ont été obtenus en utilisant les paramètres donnés dans le tableau II.2.

Tableau II.2 paramètres de la pile à combustible

| Paramètre | Symbole | Valeur |
|-------------------------------------|--------------|------------------------------------|
| Nombre de cellules | N_s | 72 |
| Potentiel standard | E_{cell}^0 | 1.23 V |
| Courant limite | I_{lim} | 25 A |
| Constante des gaz parfaits | R | 8.314 J/K.mol |
| Constante de faraday | F | 96485 C/mol |
| Constantes empiriques | a_0 | 0.9514 V |
| | a | $-2.2 \cdot 10^{-3} \text{ V/K}$ |
| | b | $1.87 \cdot 10^{-4} \text{ V/K.A}$ |
| Paramètres de la Résistance ohmique | R_{ohm0} | $1.58 \cdot 10^{-2} \Omega$ |
| | K_{RI} | $3 \cdot 10^{-5} \Omega/A$ |
| | K_{RT} | $3.8 \cdot 10^{-5} \Omega/K$ |
| Facteur d'utilisation | U | 80 % |
| Masse | M_{PAC} | 6 Kg |
| Capacité thermique | C_{PAC} | 10^4 J/Kg.K |
| Coefficient de transfert de chaleur | h | $20 \text{ (W/m}^2\text{.K)}$ |
| Surface effective | A | 0.09 m^2 |

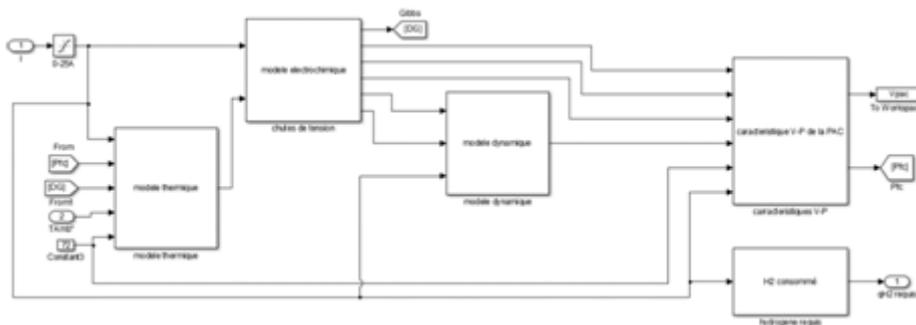


Figure II.10 : Modélisation de la PAC sous Matlab/Simulink

f. Résultats de simulation de la pile à combustible

Après l'implémentation du modèle de la PEMFC sous Matlab/Simulink, La simulation va nous permettre d'examiner l'influence de la variation des paramètres d'entrées de la pile sur son bon fonctionnement. Les courbes de la figure II.11 sont obtenues pour différentes températures T (°C) = 10, 20, 30, 50. Elles représentent l'influence de la variation de la température ambiante sur la tension et puissance de la PEMFC.

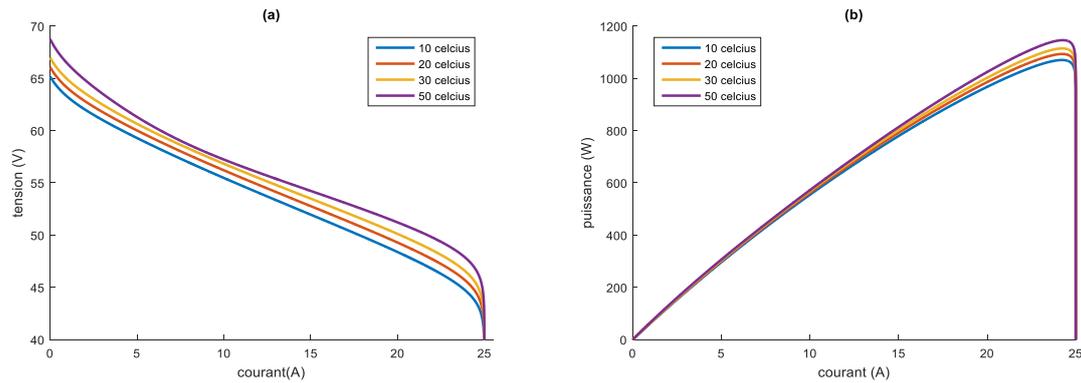


Figure II.11 : effet de la température sur : (a) caractéristique V-I de la PAC, (b)

La figure II.12 montre : (a) la variation de la température de la pile étudiée en fonctionnement statique sur une période d'une heure, (b) le débit d'hydrogène consommé pour produire 1 kW de puissance. La température initiale de la pile a été réglée à 25 °C.

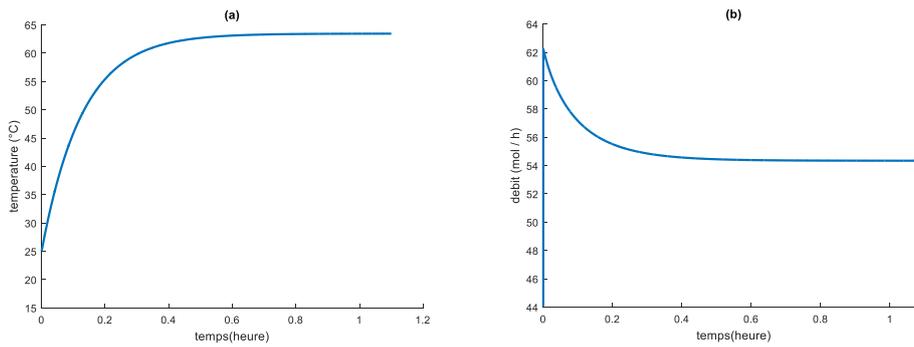


Figure II.12 : (a) profil de la température dans la pile à combustible en régime statique, (b) débit d'hydrogène consommé.

3. L'électrolyseur

Dans un système PV/PAC, l'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 (PEMFC), ce qui générera le manque d'électricité nécessaire pour alimenter la charge lorsque le PV ne peut pas répondre aux exigences de cette charge.

Différents types d'électrolyseurs se distinguent par leur électrolyte et leur porteur de charge : les électrolyseurs alcalins, les électrolyseurs à membrane échangeuse de protons (PEM) et les électrolyseurs à oxyde solide (SO). Les technologies alcalines et PEM sont actuellement disponibles dans le commerce, contrairement à la technologie des oxydes solides qui est en phase de recherche et développement. La technologie alcaline est la plus mature et la plus répandue par rapport à la technologie PEM (encore en développement)[34].

La construction d'un électrolyseur ressemble à celle d'une batterie ou à celle d'une pile à combustible. Il comporte une anode, une cathode et un électrolyte. Sur l'électrode négative, les protons sont retirés de l'électrolyte et les électrons sont apportés par une connexion électrique externe.

a. Représentation chimique

Les électrolyseurs, plus spécifiquement les alcalins, sont des engins largement utilisés pour générer de l'hydrogène par électrolyse de l'eau. Un électrolyte liquide est nécessaire pour conduire les ions, facilitant leur échange entre les électrodes d'anode et de cathode. L'hydroxyde de potassium (KOH) est principalement utilisé comme électrolyte compte tenu de sa conductivité optimale et de sa résistance à la corrosion de l'acier inoxydable [24].

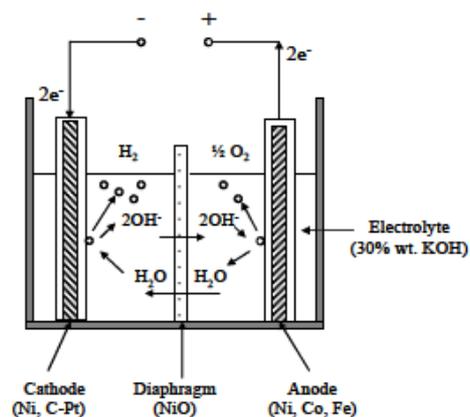


Figure II.13: la structure interne d'un électrolyseur alcalin

La réaction électrochimique globale au sein d'un électrolyseur est présentée ci-dessous :



L'électrolyse de l'eau ne se produit qu'en présence d'un courant électrique. Par conséquent, on peut voir qu'avec une alimentation cohérente en courant électrique, il y aura une production cohérente d'hydrogène.

b. Modèle électrochimique

Les propriétés cinétiques autour des électrodes dans une cellule d'électrolyseur peuvent être modélisées sur la base de relation empirique courant tension I-V [40].

On se basant sur les travaux [22][24][36][40], la caractéristique U-I d'un électrolyseur alcalin est définie comme :

$$U_{E_cell} = U_{rev} + \frac{r_1+r_2T}{A}I + s \ln\left(\frac{t_1+\frac{t_2}{T}+\frac{t_3}{T^2}}{A}I + 1\right) \dots \dots (II-42)$$

Où U_{E_cell} , est la tension aux bornes de la cellule (V), U_{rev} est la tension réversible de cellule (V), r_1 , r_2 sont des paramètres pour la résistance ohmique ($\Omega.m^2$, $\Omega.m^2/^\circ C$), comme coefficients pour la tension ohmique, $s(V)$, $t_1(m^2.A^{-1})$, $t_2(m^2.^\circ C.A^{-1})$, $t_3(m^2.^\circ C^2/ A^{-1})$ sont des paramètres de surtension, A est l'aire de l'électrode cellulaire (m^2), I est le courant (A) d'électrolyseur, et T est la température de la cellule ($^\circ C$).

U_{rev} est donnée par la variation de l'énergie libre de Gibbs du processus électrique comme indiqué ci-dessous.

$$U_{rev} = -\frac{\Delta G}{zF} \dots \dots (II-43)$$

Où, z est le nombre de molécules transférées par molécule d'hydrogène, égal à 2, ΔG est l'énergie libre de Gibbs, et F est la constante de Faraday. Et U_{rev} peut être exprimée par une équation empirique comme :

$$U_{rev} = U_{rev}^0 - k_{rev}(T - 25) \dots \dots (II-43)$$

Où U_{rev}^0 est la tension réversible de la cellule dans les conditions standards (V), et k_{rev} est le coefficient de température empirique de $U_{rev}(V/^\circ C)$. Les cellules d'électrolyseur, comme pour les cellules d'une pile à combustible, sont connectées en série, par conséquent, le courant est le même et la tension est donnée par

$$U_E = n_c \cdot U_{E.cell} \dots \dots (II-44)$$

c. Modèle thermique

Comme le modèle électrochimique, le modèle thermique décrivant la variation de la température au sein de l'électrolyseur est définie selon les travaux rapportés dans [22] [24][40].

Le bilan énergétique global peut être exprimé comme :

$$C_t \frac{dT}{dt} = \dot{q}_{gen} - \dot{q}_{perte} - \dot{q}_{refroidissement} \dots \dots (II-45)$$

Où C_t est la capacité thermique globale de l'électrolyseur, T est la température en Kelvin.

\dot{q}_{gen} est la puissance calorifique générée à l'intérieur de l'électrolyseur. Elle peut être écrite comme :

$$\dot{q}_{gen} = n_c (V - V_{th}) \cdot I \dots \dots (II-46)$$

Avec $V_{th} = \frac{-\Delta H}{2F}$ est la tension thermique, elle est égal a 1.482 dans les conditions standard.

\dot{q}_{perte} la perte de puissance calorifique. Il peut être déterminé par :

$$\dot{q}_{perte} = \frac{1}{R_t} (T - T_{amb}) \dots \dots (II-47)$$

R_t est résistance thermique de l'électrolyseur, T_{amb} est la température ambiante.

$\dot{q}_{refroidissement}$ la perte de puissance calorifique dû au refroidissement, peut être exprimée par :

$$\dot{q}_{refroidissement} = C_{cm} (T_{cm,s} - T_{cm,e}) \dots \dots (II-48)$$

C_{cm} est la capacité thermique de l'eau de refroidissement, $T_{cm,e}$ est la température de l'eau de refroidissement d'entrée, $T_{cm,s}$ est la température de l'eau de refroidissement de sortie.

$$T_{cm,s} = T_{cm,e} + (T - T_{cm,e}) \left(1 - \exp \left(-\frac{VA_{HX}}{C_{cm}} \right) \right) \dots \dots (II-49)$$

VA_{HX} est le coefficient de transfert de chaleur global. Il peut être obtenu par l'équation empirique :

$$VA_{HX} = h_{cond} + h_{conv} \cdot I \dots \dots (II-50)$$

Où h_{cond} et h_{conv} sont les paramètres liés respectivement au transfert de chaleur par conduction et au transfert de chaleur par convection.

En utilisant les équations définies ci-dessus, le bilan énergétique global deviendra

$$\frac{dT}{dt} + aT - b = 0 \dots \dots (II-51)$$

La solution de l'équation différentielle du bilan est donc

$$T(t) = \left(T_{ini} - \frac{b}{a}\right) \exp(-at) + \frac{b}{a} \dots (II-52)$$

Avec

$$a = \frac{1}{R_t \cdot C_t} + \frac{C_{cm}}{C_t} \left(1 - \exp\left(-\frac{V_{A_{HX}}}{C_{cm}}\right)\right) \dots (II-53)$$

$$b = \frac{n_c(V - V_{th}) \cdot I}{C_t} + \frac{T_{amb}}{R_t C_t} + \frac{C_{cm} T_{cm,e}}{C_t} \left(1 - \exp\left(-\frac{V_{A_{HX}}}{C_{cm}}\right)\right) \dots (II-54)$$

d. Taux d'hydrogène produit

Connaissant la tension et le courant de l'électrolyseur, la quantité d'hydrogène générée par rapport au temps peut être calculé par

$$\dot{n}_{H_2,prod} = \eta_F \frac{N_c I}{2F} \dots (II-55)$$

Où \dot{n}_{H_2} est le taux de production d'hydrogène (mol/s) et η_F est le rendement Faradique. En augmentant le courant, le rendement faradique augmente et le rapport du courant parasite à l'électrolyte diminue.

L'équation du rendement faradique est exprimée ci-dessous en fonction de la densité de courant.

$$\eta_F = \frac{\left(\frac{I}{A}\right)^2}{f_1 + \left(\frac{I}{A}\right)^2} f_2 \dots (II-56)$$

Où f_1 ($\text{mA}^2 \text{cm}^{-4}$), et f_2 sont des paramètres de calcul du rendement faradique. Comme le courant de l'électrolyseur dépend de la température, l'efficacité du courant est également fonction de la température. Ainsi, avec une hausse de température, la résistance du fluide baisse améliorant l'efficacité. Cependant, la tendance s'inverse à très hautes températures, où la production de bulbes génère des courants parasites dans le fluide électrolytique, dégradant l'efficacité [24].

La ventilation de l'électrolyseur est conçue pour maintenir la température du système constante. Ceci malgré la variation de température observée lors du fonctionnement du système du fait du fonctionnement thermique de l'appareil.

e. Implémentation du modèle d'électrolyseur dans Matlab/Simulink

Sur la base des équations mathématiques présentées avant dans les modèle thermique et électrochimique, le modèle dynamique d'un l'électrolyseur alcalin a été développé sous Matlab/Simulink à l'aide des paramètres rapportés dans [40].

Les paramètres du modèle implémenté dans Matlab sont donnés dans le Tableau ci-dessous.

Tableau II.3 paramètres électrique d'un électrolyseur alcalin [40].

| Paramètre | Symbole | Valeur |
|---|-------------|---|
| Tension réversible de la cellule | U_{rev}^0 | 1.23 V |
| Coefficient de température | k_{rev} | $1.93 \cdot 10^{-3} \text{ V}/^\circ\text{C}$ |
| Résistance ohmique | r_1 | $7.3 \cdot 10^{-5} \Omega \cdot \text{m}^2$ |
| | r_2 | $-1.1 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}^2 / ^\circ\text{C}$ |
| Paramètres de surtension | s | 0.185 V |
| | t_1 | $-1.002 \text{ m}^2 / \text{A}$ |
| | t_2 | $8.424 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C} / \text{A}$ |
| | t_3 | $247,3 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}^2 / \text{A}$ |
| Surface effective | A | 0.25 m^2 |
| Paramètres de calcul du rendement faradique | f_1 | $250 \text{ mA}^2 / \text{cm}^4$ |
| | f_2 | 0.96 |
| Coefficient de transfert de chaleur | h_{conv} | $0.02 \text{ W}/^\circ\text{C} \cdot \text{A}$ |
| | h_{cond} | $7 \text{ W}/^\circ\text{C}$ |
| Capacité thermique | C_t | $625 \text{ kJ}/^\circ\text{C}$ |
| Résistance thermique | R_t | $0:167^\circ\text{C}/\text{W}$ |

La figure II.14 représente le schéma de la modalisation d'un électrolyseur sous l'environnement de Matlab/Simulink.

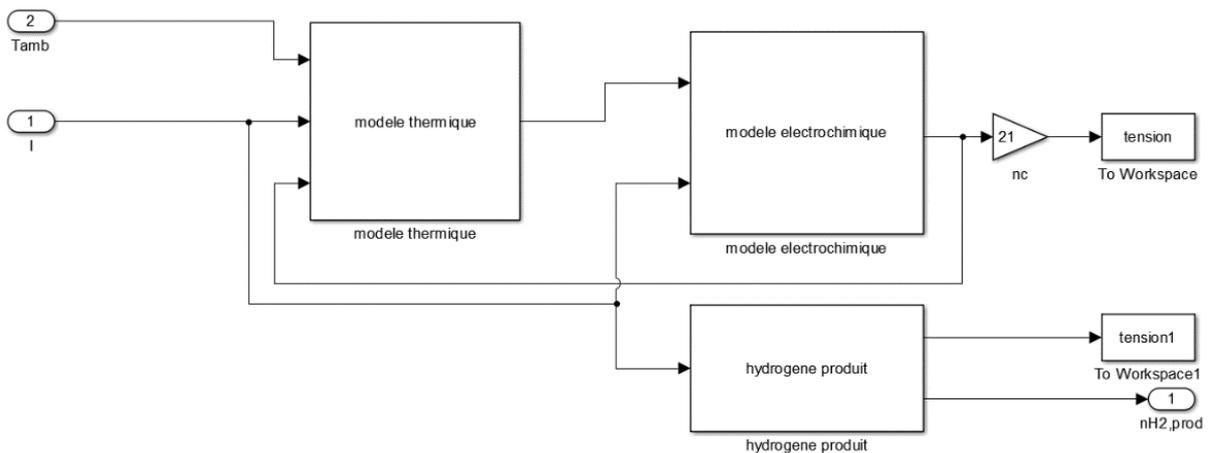


Figure II.14 : modélisation d'un électrolyseur sous Matlab/Simulink

f. Performance du modèle de l'électrolyseur

L'influence de la température sur les caractéristiques du modèle de l'électrolyseur est donnée en Figure.II.15.lorsque la température de fonctionnement de l'électrolyseur augmente, la tension de sortie de ce dernier diminue.

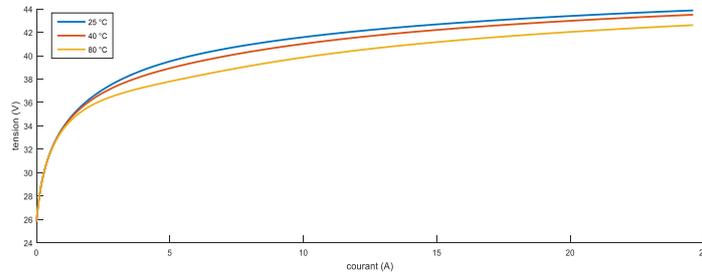


Figure II.15 : influence de la température sur la caractéristique I-V de l'électrolyseur

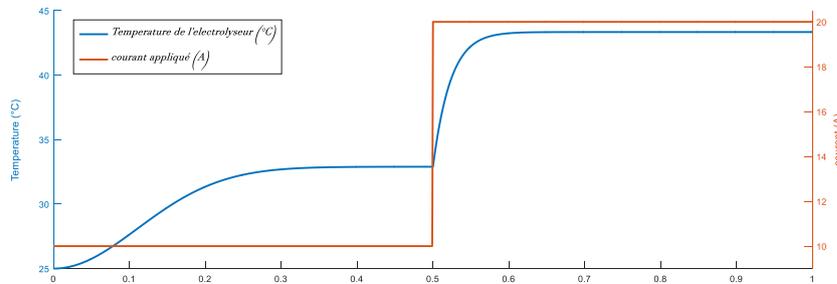


Figure II.16 la réponse en température du modèle d'électrolyseur implémenté

La figure.II.16 montre la réponse en température du modèle. Pour les nécessités de simulation, les températures d'entrées (température ambiante et température d'eau de refroidissement) sont supposées à 25°C. Sur une période d'une heure, dans les 30 premières minutes un courant de 10A est applique sur l'électrolyseur et monte de façon abrupte à 20A.

4. Réservoir d'hydrogène

L'hydrogène que produit l'électrolyseur 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 photovoltaïque afin de répondre à la demande de charge du consommateur [10].Le nombre de moles stockées dans le réservoir, est exprimé comme suit [25].

$$n_{H_2} = \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} (\dot{n}_{H_2,pro} - \dot{n}_{H_2,req}) dt + n(t_0) \dots (II-57)$$

Parmi les méthodes de stockage d'hydrogène citer dans le chapitre 1, le stockage sous forme gazeuse est la méthode de stockage la mieux adaptée et la moins complexe pour notre système. Cette méthode est décrite et modéliser dans ce qui suit.

❖ *Modélisation du réservoir pressurisé*

L'hydrogène gazeux comprimé ou l'hydrogène liquide peuvent être stockés dans des réservoirs en utilisant différentes techniques comme le stockage physique de l'hydrogène. Cette technique de stockage est utilisée pour calculer la pression de stockage d'hydrogène, couplée au débit, comme dicté par l'équation suivante [24],[36].

$$P_b - P_{bi} = z \times \frac{q_{H_2}RT_b}{M_{H_2}V_b} \dots \dots (II-58)$$

Où P_b est la pression du réservoir qui est mesurée en (Pascal), P_{bi} est la pression initiale du réservoir de stockage en (Pascal), R est la constante de gaz universelle (J/mol.K), T_b est la température de fonctionnement (K), V_b est le volume du réservoir (m^3) et z est le facteur de compressibilité en fonction de la pression, comme indiqué dans l'équation suivante.

$$z = \frac{PV_m}{RT} \dots \dots (II-59)$$

Où P et V_m sont respectivement la pression et le volume molaire.

5. Convertisseurs électroniques

Le circuit électronique de puissance joue un rôle important pour interfacer le système PV/PAC. Cette interface électronique utilise souvent des convertisseurs DC-DC et onduleurs pour augmenter la tension de sortie des systèmes de génération d'électricité et convertir le DC en AC. En plus le convertisseur DC-DC régule la tension d'entrée de l'onduleur et assure l'isolement [16].

a. Convertisseur DC-DC

Les convertisseurs DC-DC utilisés pour les applications PV et PAC peuvent être non isolants ou isolants. Le convertisseur non isolant est utilisé lorsque la tension doit être augmentée ou diminuée et aucune isolation diélectrique n'est requise. Les convertisseurs d'isolement sont utilisés lorsque l'isolement et un taux de conversion élevé sont requis [16].

Le générateur photovoltaïque et la pile à combustible sont connectés au bus DC via un convertisseur BOOST pour élever leur tension de sortie. La relation entre l'entrée et la sortie du convertisseur DC-DC est définie comme les équations suivantes [25] :

$$P_{PV-DC} = \eta_{DC-DC} \cdot P_{PV} \dots (II-60)$$

$$P_{PAC-DC} = \eta_{DC-DC} \cdot P_{PAC} \dots (II-61)$$

Où η_{DC-DC} exprime l'efficacité du convertisseur DC-DC.

b. Convertisseur DC-AC

Les convertisseurs de puissance DC-AC sont utilisés dans le système d'énergie hybride PV/PAC pour convertir le DC en AC. La puissance de sortie des panneaux photovoltaïques et des piles à combustible est DC cependant, pour répondre à la demande de charge AC, des onduleurs sont nécessaires.

Par conséquent, la puissance de sortie de l'onduleur, P_C , peut être calculée comme :

$$P_{ch} = \eta_{DC-AC} \cdot (P_{PV} + P_{PAC}) \dots (II-62)$$

Où η_{DC-AC} est l'efficacité de l'onduleur DC-AC

IV. METHODE DE GESTION OPTIMALE DE L'ENERGIE

Dans les systèmes d'énergie hybride autonomes, une gestion efficace de l'énergie est nécessaire pour atteindre la fiabilité et la rentabilité de l'électricité produite. En se basant sur le travail de [10] et [26], une stratégie de gestion optimale d'un système PV/PAC est présentée ci-dessous. La charge étudiée est une maison alimentée par un système PV/PAC autonome. La stratégie de contrôle est conçue pour satisfaire les demandes de charge de la maison tout au long de la journée et après le coucher du soleil.

Dans cette étude, la demande de charge, doit être satisfaite par la production d'énergie solaire et les piles à combustible. La différence entre la production d'électricité et la demande de charge à tout moment peut être calculée comme suit :

$$\Delta P(t) = P_{pv}(t) - \left[\frac{P_{ch}(t)}{\eta_{inv}} \right] \dots (II-63)$$

Où $P_{PV}(t)$, $P_{ch}(t)$ sont respectivement, la puissance produite par les panneaux PV, la demande de la charge à un moment particulier.

La stratégie, consiste à ce que l'utilisation de l'énergie générée par le système PV soit prioritaire par rapport à celle fournie par le système PAC pour satisfaire la demande d'énergie. Si la puissance totale générée par le système PV est supérieure à la demande ($\Delta P(t) \geq 0$), 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 définie par les conditions extrêmes.

Si la puissance totale générée par le champ PV est égale à la puissance demandée par la charge ($\Delta P(t) = 0$), y'aura pas d'échange de puissance et la demande totale est satisfaite par la génération solaire.

Enfin, Si la puissance électrique totale générée par le système PV est inférieure à la demande, l'alimentation sera fournie par le système PAC 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:

$$P_{PAC}(t) = \left(\frac{P_{ch}(t)}{\eta_{inv}} \right) - (P_{pv}(t)) \dots \dots (II-64)$$

Selon cette stratégie de contrôle, si la pile à combustible est allumée, l'électrolyseur doit être en position d'arrêt. L'arrêt de l'électrolyseur signifie en fait que l'électrolyseur passe en mode veille, car il ne peut jamais être complètement éteint, car cela endommagerait les électrodes. Le pas de temps de contrôle (Δt) est d'une heure pour cette opération de longue durée. Ainsi, le module super-condensateur qui représente un stockage unité pour un fonctionnement à court terme, pour fournir une réponse de puissance plus stable aux changements transitoires dans la demande de charge ou pour stabiliser le fonctionnement de la pile à combustible, n'est pas pris en compte dans notre étude.

Dans le cas où le réservoir d'hydrogène n'a pas suffisamment d'hydrogène, alors la charge non satisfaite est calculée comme suit :

$$P_{def}(t) = \left[\frac{P_{ch}(t)}{\eta_{inv}} \right] - [P_{pv}(t) + P_{PAC}(t)] \dots \dots (II-65)$$

La charge non satisfaite doit être nulle pour garantir qu'elle est servie de manière fiable, tout en minimisant la fonction objective. La probabilité de perte d'alimentation (LPSP) pendant une période de temps considérée doit être inférieure à une certaine valeur prédéterminée mathématiquement, LPSP peut être calculé comme :

$$LPSP = \frac{\sum_1^t P_{def}(t)}{\sum_1^t P_{ch}(t)} \dots \dots (II-66)$$

Afin de résoudre le problème de dimensionnement optimal, le LPSP peut être maintenu dans une bande spécifique de tolérance. Dans ce travail, la limite maximale de LPSP a été considérée de 1%.

La gestion de l'énergie, L'algorithme est illustré à l'aide d'un organigramme simplifié, comme le montre la figure II.17.

V. CONCLUSION

Ce second chapitre porte sur la description du système PV/PAC, ses composants sont décrits individuellement, en mettant en exergue leurs paramètres les plus influents, formulation analytique et leurs caractéristiques en statique et en dynamique. Puis, une méthode de gestion optimale du système est annoncée, décrite et mise sous forme d'un organigramme.

Ce chapitre servira de base pour la suite de notre travail, car il va nous permettre de modéliser et de simuler sous Matlab Simulink le système PV/PAC de notre étude.

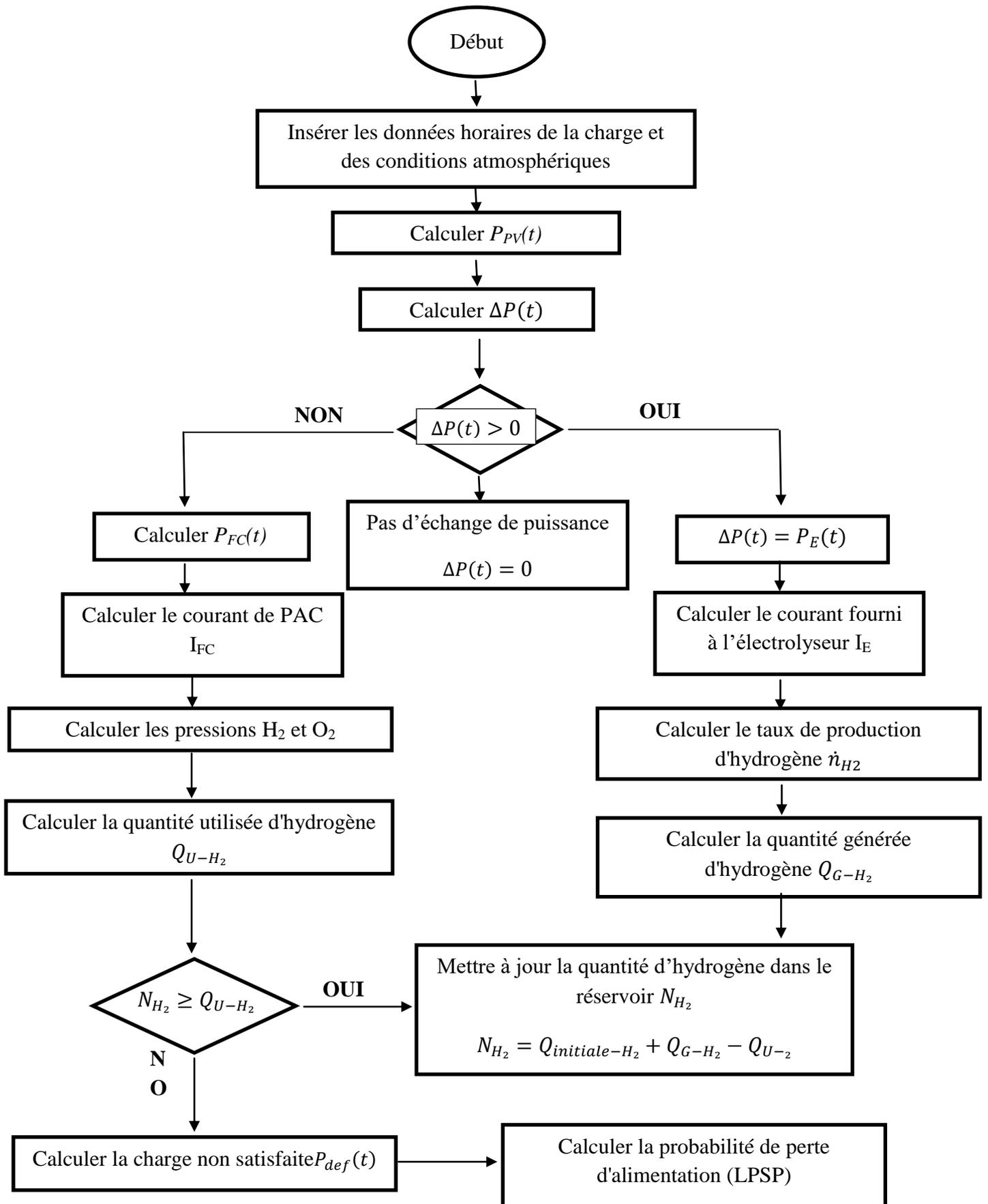


Figure II.17 organigramme du principe de fonctionnement du système PV/PAC

CHAPITRE III

SIMULATION DU SYSTÈME PV/PAC

I. INTRODUCTION

Le système hybride PV/PAC étudié est conçu pour être totalement autonome pour générer, stocker et fournir de l'énergie électrique aux charges locales. Il est simulé pour prédire ses performances avant sa mise en œuvre. Ce système est souvent installé dans les zones rurales et éloignées. Ainsi, il est important dans la conception d'optimiser la configuration du système, la taille des composants et les paramètres de contrôle. La conception par simulation permet d'étudier les différentes options, de prendre en compte divers paramètres d'influence et de répondre efficacement aux exigences du système et de l'utilisateur. Les modèles mathématiques des composants du système sont interconnectés pour former une représentation générale de l'ensemble du système, via un contrôleur de supervision central qui définit la manière dont les composants interagissent pour simuler le fonctionnement de l'ensemble du système. Dans ce chapitre, un système hybride PV/PAC autonome sera simulé. Tous les composants du système ont été modélisés et validés dans le chapitre précédent. Ce chapitre présentera une simulation du système étudié selon différents scénarios et une comparaison entre les différents résultats des scénarios de fonctionnement du système.

II. DESCRIPTION DU LOGICIEL DE SIMULATION

Un certain nombre de logiciels de simulation des systèmes hybrides, tels que TRNSYS, INSEL, HYBRID2, etc., ont été développés par différentes équipes de recherche au cours des deux dernières décennies. La plupart de ces logiciels simulent des systèmes hybrides donnés et prédéfinis sur la base d'une description mathématique des caractéristiques de fonctionnement des composants et du flux d'énergie du système. Une brève description de ces packages peut être trouvée dans [22]. La précision de la simulation reflète la précision avec laquelle la performance d'un système peut être évaluée par un modèle de simulation. Cependant, il faut se rendre compte que dans les études de conception et d'analyse, la précision du modèle de simulation n'est que l'un des facteurs qui déterminent la précision de la simulation. Des informations précises sur le système conçu, la charge, les données météorologiques et la flexibilité des outils de simulation sont également des facteurs influençant la précision de la simulation.

Par conséquent, le choix d'outils de simulation efficaces et la préparation des données appropriées peuvent fournir des résultats de simulation fiables et utiles.

Dans ce travail, un logiciel de simulation appelé Matlab/Simulink est utilisé. Ce logiciel a été choisi en raison de sa structure modulaire et sa puissance de calcul. Matlab/Simulink sont des produits de MathWorks Inc., et sont utilisés pour le développement des techniques de calcul et de la conception basée sur des modèles. Simulink est l'extension graphique de Matlab et sert à la modélisation et la simulation des systèmes dynamiques. Cet environnement graphique est une plateforme de simulation multi domaines basée sur les flots de signaux d'entrée et de sortie. Il contient un ensemble de bibliothèques qui peuvent être adaptées et enrichies aux besoins du concepteur.

III. DONNEES D'ENTREE ET DE SORTIE DU PROGRAMME DESIMULATION

Une quantité limitée d'informations est généralement disponible sur le système à concevoir ou analysé. La demande de charge de l'utilisateur peut ne pas être entièrement connue. Les données sur les ressources peuvent ne pas être disponibles sur le site d'intérêt avec les résolutions requises ou avec des statistiques connues concernant les moyennes climatologiques. Dans cette situation, les données doivent être générées à partir de la moyenne quotidienne ou valeurs moyennes mensuelles.

Deux classes de données d'entrée sont nécessaires pour définir le modèle de simulation du système. La première classe comprend les caractéristiques techniques, et celles-ci seront définies pour le modèle de simulation. Cette classe a été étudiée en détail dans le chapitre précédent. La deuxième classe de données comprend les données de la météo et de la demande de charge de l'utilisateur. Toutes ces données sont insérées dans le programme de simulation.

1. Données météorologiques et demande de charge de l'utilisateur

Des prévisions analytiques précises pour les performances à long terme des systèmes hybrides nécessitent, en entrée des données, des informations fiables à la fois sur la source renouvelable comme le rayonnement solaire et sur la demande de charge l'utilisateur. Il faut disposer de suffisamment de mesures ou de procédures d'estimation pour fournir le modèle de simulation avec les données météorologiques et la demande de charge des utilisateurs nécessaires.

a. Données météorologiques

Les importantes données météorologiques requises pour le système hybride PV/PAC analysé dans cet travail sont le rayonnement solaire, [W/m²] et la température ambiante, [°C]. Ces données doivent être fournies au modèle de simulation sur une base horaire. Le rayonnement solaire et la température ambiante sont obtenus à l'aide du calculateur du site CDER [42], qui calcule les données météorologiques sur les surfaces des panneaux orientés et inclinés arbitrairement à n'importe quel endroit souhaité sur la terre.

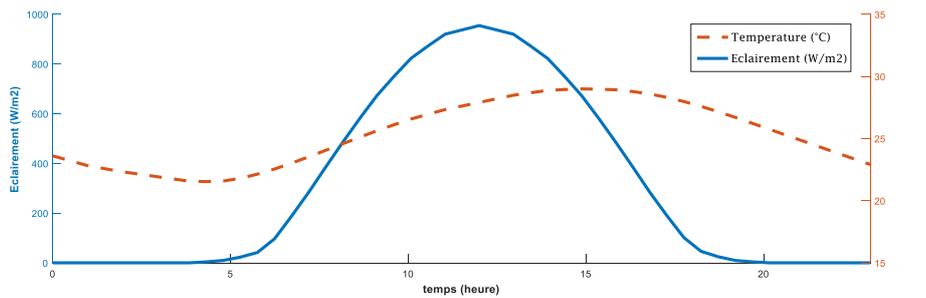


Figure III.1 : données météorologiques du solstice d'été.

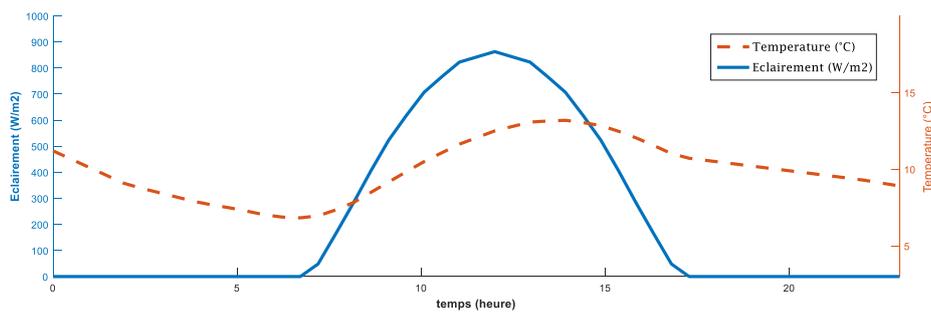


Figure III.2 : données météorologiques du solstice d'hiver.

b. Données de demande de charge de l'utilisateur

Une étape importante dans la conception du système est l'estimation des besoins en puissance pour l'application. Certaines études de simulation utilisent des moyennes de charge annuelle ou saisonnière. Cependant, les études précises de simulation nécessitent une résolution temporelle plus élevée pour les données de charge de l'utilisateur, de quelques minutes à quelques heures. Par conséquent, la courbe de charge de l'application envisagée sur la période d'étude doit être disponible sur une base horaire.

La méthode de gestion d'énergie décrite précédemment est appliquée à une étude de cas : le système PV/PAC doit approvisionner une maison sur Bejaia/Soummam (36.72°N , 5.07°E). Le dimensionnement est basé sur des données horaires d'irradiations solaires sur un plan incliné.

Nous avons choisi de déterminer la configuration du système hybride pour un profil de consommation (figure III.3) utilisant des appareils à haute efficacité énergétique (lampes fluorescentes, réfrigérateur à forte isolation,..) et conduisant à un niveau de confort moyen.

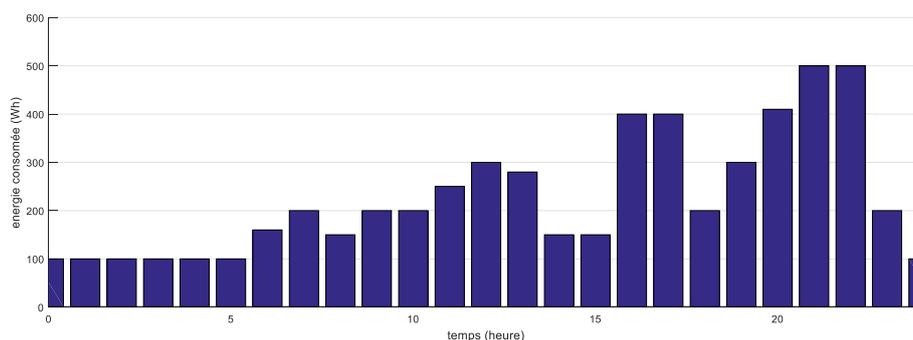


Figure III.3 : profil de la charge.

La taille des composants du système, le stockage et les unités de transformation d'énergie sont influencées par la demande de charge de l'utilisateur. Pour trouver leurs tailles optimales, des simulations sur un ou plusieurs années peuvent être nécessaires. Outre les charges requises par l'utilisateur, le système lui-même consomme de l'énergie. Ce type d'énergie est appelé charge parasite et peut être à la fois thermique et électrique. Des charges qui sont considérés comme parasites sont, par exemple, la puissance requise par les contrôleurs, ou pour faire fonctionner les ventilateurs, etc. et la chaleur requis par certains composants ou parties des composants du système.

2. Paramètres des composants du système

Chaque modèle de composant nécessite un certain nombre de paramètres nécessaires au programme d'exécution. Les paramètres correspondants des composants du système sont donnés dans le chapitre précédent.

3. Données du système de sortie

Le modèle de simulation développé fournit des informations suffisantes sur les performances de chaque composant et du système. Pendant l'exécution du programme, toutes les variables système nécessaires à une analyse des performances sont enregistrés dans un fichier de sortie de simulation. Par exemple, toutes les valeurs de l'hydrogène produit par l'électrolyseur, consommation d'hydrogène par la pile à combustible, énergie générée par la pile à combustible pour couvrir le déficit d'énergie du générateur PV pour satisfaire la demande de charge de l'utilisateur, l'énergie photovoltaïque générée, etc. est fournie. Ces résultats de sortie peuvent être analysés pour couvrir tous aspects de performance du système global.

IV. HYPOTHESES DE SIMULATION

Les principales hypothèses formulées dans la simulation du système hybride PV/PAC sont[39] :

- En général, la pile à combustible PEMFCH₂/O₂ a de meilleures performances que la pile à combustible PEMFCH₂/Air, mais nécessite un stockage d'oxygène ou un système de purification. Dans ce travail, la pile à combustible PEMH₂/Air être utilisé dans le système simulé. Ainsi, aucun système de purification ou de stockage d'oxygène n'est obligatoire.
- Certaines pertes d'hydrogène sont attendues telles que des pertes d'hydrogène dans l'électrolyseur ou la pile à combustible lors du démarrage et de l'arrêt, les pertes d'hydrogène dans le réservoir de stockage de gaz et les pertes d'hydrogène dans la pile à combustible pendant le fonctionnement, mais ceux-ci ne seront pas inclus dans la simulation.

- De nombreuses charges parasites sont gérées par une alimentation auxiliaire telle que pour la pompe nécessaire au refroidissement à l'eau de l'électrolyseur ou de la pile à combustible, courant de protection pour l'électrolyseur pendant le fonctionnement de secours, système de purification d'hydrogène et acquisition de données et système de contrôle. Ces puissances parasites sont omises de la simulation du système. L'inclusion de ces pertes **conduirait bien sûr à des résultats différents, mais n'affectera pas décisions requises de la simulation pour faire fonctionner le système de manière optimale.** 3wd sgmha mch mfhoma

V. DIMENSIONNEMENT DES COMPOSANTS DU SYSTEME PV/PAC

1. Générateur PV

Les paramètres essentiels pour le dimensionnement du système sont l'énergie solaire quotidienne moyenne et les énergies de consommation de la charge. Ces paramètres peuvent être utilisés pour calculer la puissance crête du générateur PV et la quantité d'énergie à stocker, afin d'assurer l'autonomie du système. Afin de dimensionner le générateur photovoltaïque, l'équation suivante est généralement utilisée [39]:

$$A_{PV} = \frac{E_{ch}}{\eta_{sys} \cdot I_r} \text{ Et } P_{PV} = G \cdot \eta_{PV,STC} \cdot A_{PV} \dots \text{(III-1)}$$

Avec

A_{PV} Surface du générateur PV, [m²]

E_{ch} Consommation énergétique quotidienne moyenne de la charge, [kWh/j]

I_r Énergie solaire moyenne quotidienne, [kWh/m²/ j]

η_{sys} : Efficacité totale du système en tenant compte de l'efficacité de conversion PV, des fils, des diodes, de la conversion chimique, etc.

$\eta_{PV,STC}$: Rendement nominal du générateur PV (0,10-0,15%)

P_{PV} : Puissance de production aux conditions de test standard, [Wc].

G : Rayonnement solaire à STC, [1kW/m²]

En Algérie, l'énergie solaire moyenne quotidienne est de 5 kWh/m²/j et la consommation énergétique moyenne quotidienne de la charge est de 6 kWh/j. En supposant que le rendement nominal d'un panneau PV est de 14% (module monocristallin) et que l'efficacité totale du système est de 5%, la puissance crête du générateur PV est calculée à partir de l'équation précédente à environ 3.4 kWc, donc 14 panneaux de 255 Wc. L'efficacité du système dépend de l'efficacité des composants et sur les périodes de temps auxquelles l'énergie solaire est suffisante pour satisfaire la demande de charge de l'utilisateur.

2. Pile à combustible et l'électrolyseur

Deux équations simples sont utilisées pour déterminer la puissance nominale de l'électrolyseur et de la pile à combustible [39].

$$P_{elec} = P_{PV} - P_{ch-min} \dots (III-2)$$

$$P_{PAC} = P_{ch-max} \dots (III-3)$$

Avec : P_{elec} , puissance nominale de l'électrolyseur, [W]

P_{PAC} , puissance nominale de la pile à combustible, [W]

P_{PV} , Puissance nominale du champ PV dans les conditions standards, [W]

P_{ch-min} et P_{ch-max} , sont les puissances de charge minimale et maximale, [W]

La puissance nominale de l'électrolyseur est égale à la puissance excédentaire maximale du générateur PV sur la puissance de charge minimale. La production d'énergie de la pile à combustible dépend de la puissance de charge maximale.

3. Volume du réservoir de stockage



Le réservoir utilisé dans l'étude est un réservoir de 850 L, il peut stocker environ 4,2 kg d'hydrogène à 60 bars. Couplé à un électrolyseur, l'hydrogène généré peut être directement stocké sans compression. Ce réservoir de type 4 est léger, ce qui le rend idéal pour les applications sur des sites éloignés [41].

VI. RESULTATS DE SIMULATION

Figure III.4 :réservoir de stockage d'hydrogène 60 bar 850l - 2

Le système PV/PAC étudié est composé de 14 panneaux photovoltaïques de 255Wc, d'une pile à combustible de 1.2 kW de type PEMFC, d'un électrolyseur de puissance supérieure à 3.5kW, un réservoir de stockage d'hydrogène de 850litres, et d'une charge représentant une maison de consommation journalière de 6 kWh/j. Deux différents scénarios de simulation sont effectués afin d'évaluer le comportement du système PV/PAC durant une journée type ; le 21 décembre et le 21 juin qui représentent respectivement le solstice d'hiver, le jour le plus court de l'année, et le solstice d'été, qui est le jour le plus long de l'année.

Les différentes parties du système (panneau photovoltaïque, électrolyseur, la PEMFC et la charge) sont modélisées par des blocs séparés puis reliées entre eux d'une manière cohérente (figureIII.5).

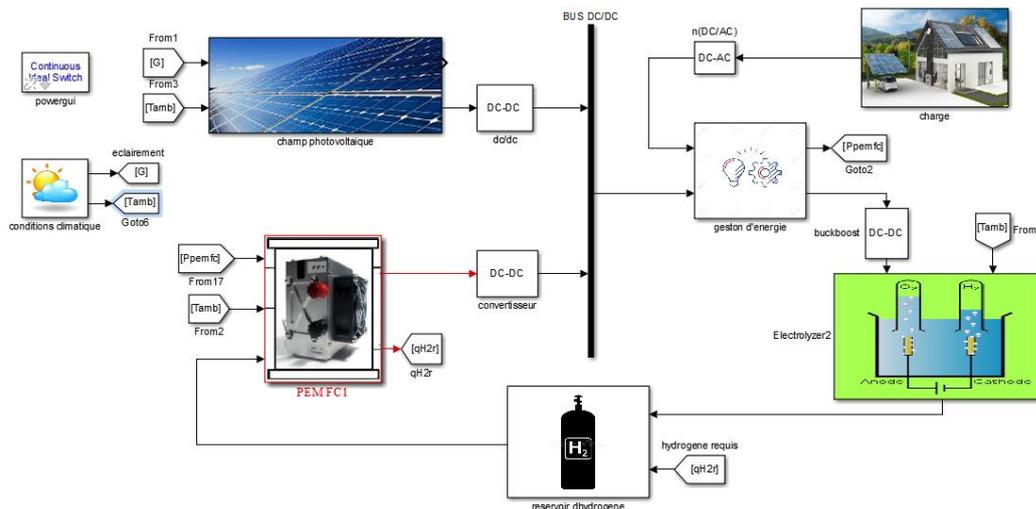


Figure III.5 : modélisation du système PV/PAC sous Matlab/Simulink.

On suppose que le temps de simulation est de 24 heures et que le réservoir d'hydrogène est rempli de 100g de dihydrogène (H₂) au démarrage de la simulation.

1. 1^{er} scenario (solstice d'hiver)

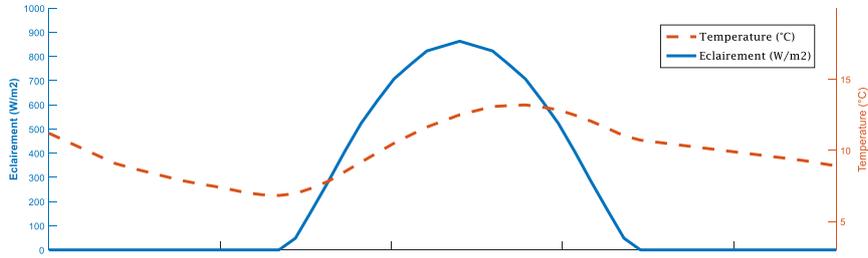


Figure III.6 : les données météorologiques du solstice d'hiver.

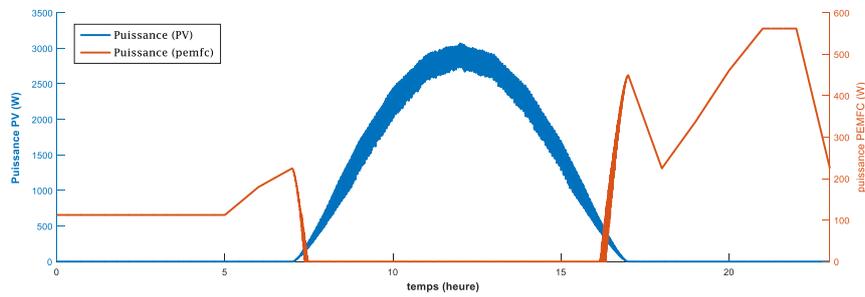


Figure III.7 : production électrique du système PV/PAC

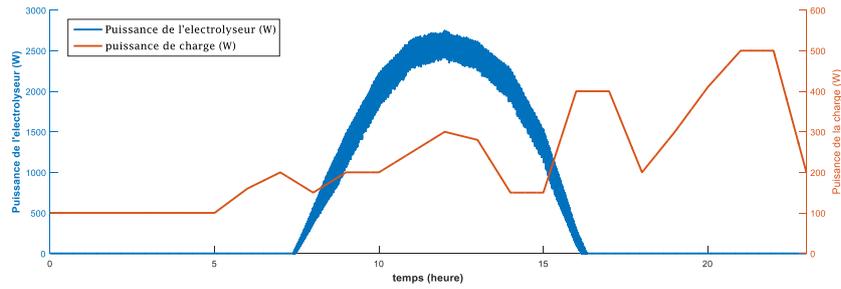


Figure III.8 : consommation électrique du système PV/PAC.

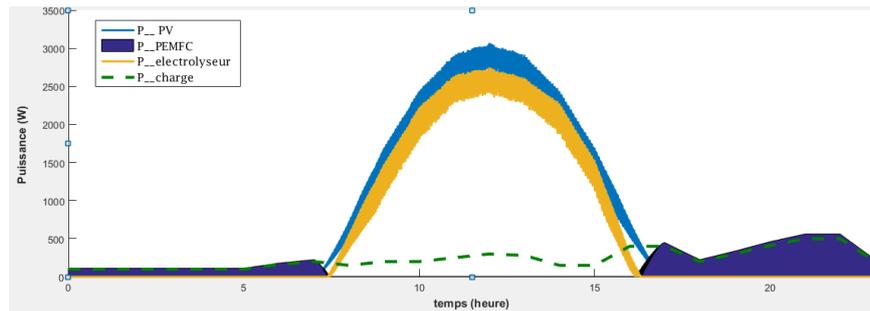


Figure III.9 : stratégie de gestion d'énergie dans le système PV/PAC.

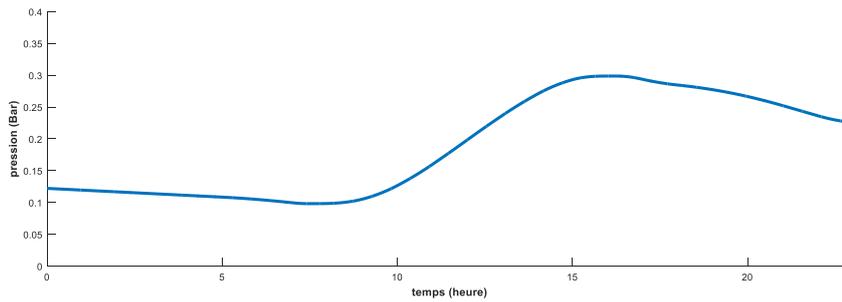


Figure III.10 : Pression d'H₂ dans le réservoir.

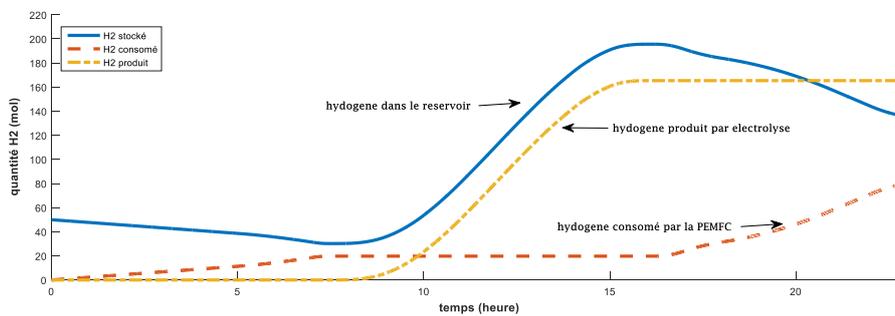


Figure III.11 : quantité d'H₂ dans le réservoir.

2. 2^{ème} scenario (solstice d'été)

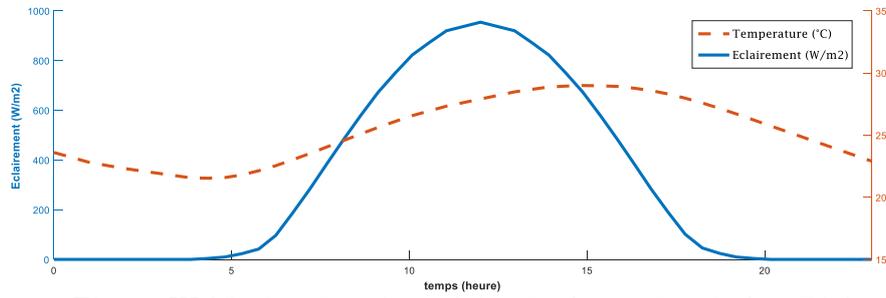


Figure III.12 : les données météorologiques du solstice d'été.

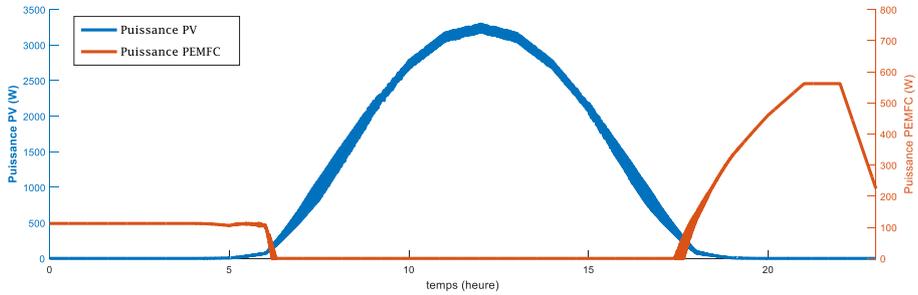


Figure III.13 : production électrique du système PV/PAC

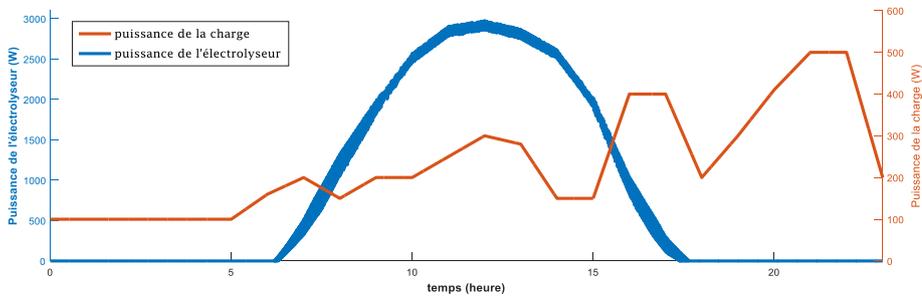


Figure III.14 : consommation électrique du système PV/PAC.

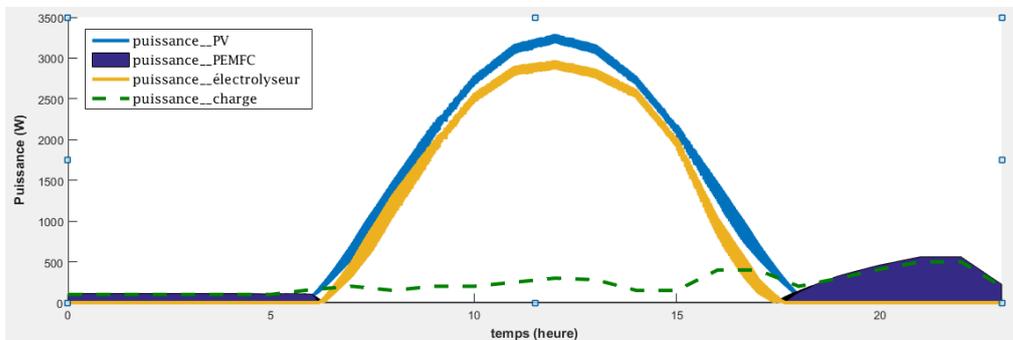


Figure III.15 : stratégie de gestion d'énergie dans le système PV/PAC

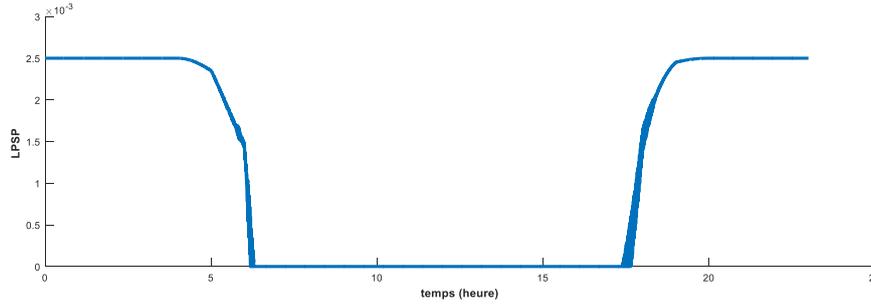


Figure III.16 : la perte de puissance dans le système PV/PAC.

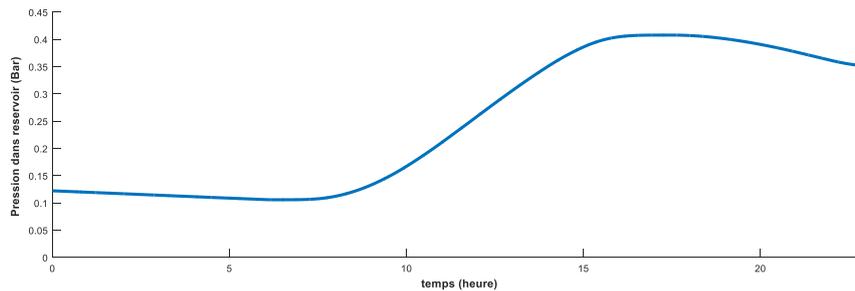


Figure III.17 : Pression d'H₂ dans le réservoir.

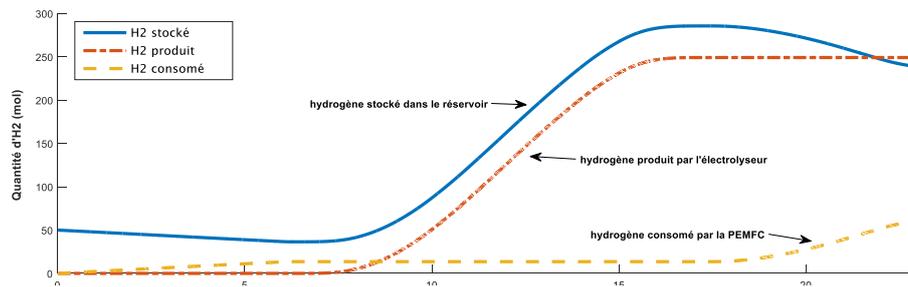


Figure III.18 : quantité d'H₂ dans le réservoir.

VII. ANALYSE DES RESULTATS

Afin de suivre la réponse des différents composants constituant le système, nous diviserons l'analyse en trois périodes de temps selon le scenario étudié.

1. 1^{er} scenario (solstice d'hiver) :

le 21 juin représente le jour le plus court de l'année, l'analyse se fera en commençant par 0h à 8h, après de 7h à 17h et enfin de 17h à minuit.

a. Le fonctionnement du système pendant l'intervalle [00h, 8h]

L'analyse des résultats de simulation conduit à diviser cet intervalle en deux sous-intervalles selon le scénario étudié.

- De minuit à 06h30 ; La puissance délivrée par le générateur PV est égal à zéro pendant cette période (figure III.7) car il n'y a pas de rayonnement solaire (figure III.6), ce qui résulte le GPV est incapable de répondre à la demande de puissance de charge qui varie entre 100W et 200W. cette incapacité nécessite une intervention de la PEMFC.

L'absence de la génération d'électricité implique la mise en veille de l'électrolyseur (figure III.8) et donc il n'y a pas d'hydrogène formé (figure III.11).

La figure III.7 représente la variation de la puissance de la pile PEMFC. Elle dépend de la demande de charge. En effet, lorsque la demande de charge est d'environ 90W, la PEMFC fournit une puissance de 90W à cause de l'absence du GPV. L'ajustement de la puissance de la pile et la puissance requise est assuré par la stratégie de contrôle d'énergie citée dans le deuxième chapitre.

- A partir de 06h30 du matin, l'éclairement commence à apparaître et cause l'apparition d'un courant aux bornes du GPV qui résulte une génération d'énergie. La puissance du GPV est incapable de répondre à la demande de charge, donc la pile PEMFC continue de fonctionner pour combler le manque de puissance requise (figure III.13). A 7h du matin, la demande de charge est d'environ 100 W, le GPV ne donne que 30 W La pile fournit les 70 W nécessaires pour le fonctionnement optimale de la charge.

La quantité d'hydrogène requise par la pile PEM continue de varier en fonction de la demande de puissance (Figure III.9) de sorte que la pression du réservoir garde sa trajectoire descendante jusqu'à atteindre la valeur 0.8 bar à 8 h (Figure III.10).

b. Le fonctionnement du système pendant l'intervalle [08h, 17h]

A partir de 08h00, A conséquence d'une augmentation du rayonnement solaire La puissance produite par le GPV atteint 3.5kW, et donc elle satisfait la demande de la charge.

L'électrolyseur commence à fonctionner et la pile à combustible est mise en position d'arrêt (Figure III.9). L'excès de puissance GPV est consommé par l'électrolyseur, la stratégie de contrôle consiste donc à calculer le courant résultant de cet excès. la quantité d'hydrogène formée est proportionnel à le courant d'électrolyseur.

La figure III.11 montre que la pression du réservoir d'hydrogène augmente avec la quantité d'hydrogène produit à partir de la valeur finale 0.8 bar obtenue à la fin de la première phase de fonctionnement du système. La puissance produite par le GPV est à son maximum de 12h lorsque le rayonnement solaire atteint son pic de 951 W/m^2 puis commence à diminuer. Quand la puissance produite par le GPV est supérieure à la demande de la charge, le système évolue dans le même sens (GPV-charge-électrolyseur) jusqu'à ce que le GPV soit incapable de couvrir la demande de charge.

c. Le fonctionnement du système pendant l'intervalle [17h, 00h]

À partir de 17 h 00, le GPV est incapable de répondre à la demande de la charge, alors il est nécessaire l'intervention de la pile PEM pour fournir le manque de puissance. Ainsi, l'électrolyseur passe en mode veille et il n'y a plus de production d'hydrogène (Figure III.11).

Le même fonctionnement décrit dans le premier intervalle est valable pendant cette période sauf qu'il y a une diminution de la puissance délivrée par le GPV en raison de la diminution du rayonnement solaire.

Jusqu'à 19 h 00, le GPV alimente la charge avec une petite puissance inférieure à celle demandée et la pile à combustible continue son rôle complémentaire de GPV. A partir de 19h le GPV cesse de fonctionner à cause de l'absence du rayonnement solaire (figures III.7 et III.8). Pendant les quatre heures restantes de la journée, la demande de charge est satisfaite seulement par le fonctionnement de la pile PEMFC.

La figure III.10 montre que la pression du réservoir diminue avec la quantité d'hydrogène consommée par la pile à combustible à partir de 0.43 bar qui est la valeur finale obtenue lors de la deuxième phase de fonctionnement. En fin de journée, la pression obtenue qui est égale à 0.33 bar sera considérée comme la pression initiale de démarrage assurant le fonctionnement de la PEMFC le jour suivant.

2. 2^{ème} scenario (solstice d'été) :

Selon le 2^{ème} scenario, correspondant au fonctionnement du système PV/PAC le 21 juin qui représente le jour le plus long de l'année, l'analyse se fera en commençant par 0h à 7h, après de 7h à 18h et enfin de 18h à minuit.

a. Le fonctionnement du système pendant l'intervalle [00h, 7h]

L'analyse des résultats de simulation conduit à diviser cet intervalle en deux sous-intervalles selon le scenario étudié.

- De minuit à 05h00 ; La puissance délivré par le générateur PV est pratiquement égal à zéro pendant cette période (figure III.14) car elle est en fonction du rayonnement solaire qui est lui aussi nul comme le montre la figure III.13. Par conséquent le GPV est incapable de répondre à la demande de puissance de charge qui varie entre 100W et 200W. Cela rend nécessaire l'intervention de la PEMFC.

Pendant cet intervalle, la puissance de l'électrolyseur est égale à zéro comme cela est montré sur la figure III.14, 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. La figure III.18 montre l'absence totale de toute quantité d'hydrogène formé et l'existence d'une quantité initiale d'hydrogène définie par la pression initiale du réservoir qui permet de fournir la demande initiale d'hydrogène pour l'empilement de la PEMFC.

Les figures III.13 montre la variation de la puissance de la pile PEMFC. Ce paramètre dépend de la puissance requise par la charge. En effet, lorsque la demande de charge est d'environ 100W, la PEMFC fonctionne et fournit une puissance de 100W en l'absence du GPV. La stratégie de contrôle d'énergie citée dans le deuxième chapitre est utilisée pour ajuster la puissance de la pile à la puissance requise.

- A partir de 05h du matin, une faible luminosité 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 PEMFC continue de fonctionner pour combler le manque de puissance requise (figure III.15). Par exemple, à 6h du matin, la demande de charge est d'environ 100 W, tandis que le GPV ne fournit que 40 W La pile doit fournir les 60 W manquants pour le fonctionnement de la charge.

La quantité d'hydrogène requise par la pile PEM continue de varier en fonction de la demande de puissance (Figure III.9) de sorte que la pression du réservoir garde sa trajectoire descendante jusqu'à atteindre la valeur 0.9 bar à 8 h (Figure III.17).

b. Le fonctionnement du système pendant l'intervalle [07h, 18h]

A partir de 07h00, le fonctionnement du système change. La puissance fournie par le GPV atteint 3.4kW 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 (Figure III.16). Le fonctionnement de ce dernier est lié à l'excès de puissance GPV, la stratégie de contrôle consiste donc à calculer le courant résultant de cet excès. Ce courant d'électrolyseur est directement proportionnel à la quantité d'hydrogène produit.

Concernant la pression du réservoir d'hydrogène, la figure III.18 montre que cette pression augmente avec la quantité d'hydrogène produit à partir de la valeur finale 0.9bar obtenue à la fin de la première phase de fonctionnement du système. La puissance fournie par le GPV atteint son maximum de 12h lorsque le rayonnement solaire atteint son pic de 951 W/m^2 puis commence à diminuer. Tant que la puissance générée par le GPV est supérieure à la puissance requise par la charge, le système évolue dans le même sens (GPV-charge-électrolyseur) jusqu'à ce que le GPV devienne incapable de couvrir la demande de charge.

c. Le fonctionnement du système pendant l'intervalle [18h, 00h]

À partir de 18 h 00, le GPV ne peut pas répondre à la demande de la charge comme présenté sur la Figure III.18. Cette situation nécessite l'intervention de la pile PEM pour fournir le manque de puissance. Ainsi, la phase d'électrolyse n'est plus fonctionnelle et il n'y a plus de production d'hydrogène (Figure III.18).

Le même fonctionnement décrit dans le premier intervalle est valable pendant cette période sauf qu'il y a une diminution de la puissance délivrée par le GPV en raison de la diminution du rayonnement solaire.

Jusqu'à 20 h 00, le GPV continue d'alimenter la charge avec une puissance inférieure à celle demandée et la pile PEM continue son rôle complémentaire de GPV. A partir de 20h, ce dernier devient incapable de fonctionner en raison de la disparition du rayonnement solaire comme le montrent les figures III.13 et III.14. Pendant les quatre heures restantes de la journée, la pile PEMFC fonctionne uniquement pour répondre à la demande de charge.

Concernant la pression du réservoir, il est évident sur la figure III.17, qu'elle diminue avec la quantité d'hydrogène consommée par la pile à combustible à partir de 0.42 bar qui est la valeur finale obtenue lors de la deuxième phase de fonctionnement. En fin de journée, la pression obtenue qui est égale à 0.34 bar sera considérée comme la pression initiale de démarrage assurant le fonctionnement de la PEMFC le jour suivant.

VIII. CONCLUSION

La puissance disponible du générateur photovoltaïque dépend fortement des conditions environnementales. Pour pallier à l'incapacité du système PV, ce dernier a été intégré à un système de pile à combustible, un électrolyseur et un système de stockage d'hydrogène pour former un système hybride autonome PV/PAC.

Dans ce chapitre, des études de simulation d'un système hybride PV/PAC autonome ont été menées à l'aide de Matlab/Simulink pour vérifier les performances du système dans différents scénarios en utilisant le profil de charge pratique. Les résultats de la simulation, donnés pour une journée des scénarios, été et hiver, montrent l'efficacité de la stratégie globale de gestion de l'énergie et la faisabilité du système d'énergie hybride alternative proposé.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

L'objectif global de ce travail est d'étudier le fonctionnement d'un système hybride à hydrogène PV/PAC autonome et de proposer une méthode de gestion optimale pour satisfaire les exigences des systèmes d'alimentation autonome. Les principales conclusions et recommandations tirées de ces travaux sont résumées ci-après.

Le travail se divise en trois chapitres ; le premier chapitre portait sur des définitions générales concernant l'énergie solaire photovoltaïque, l'hydrogène et les piles à combustible ainsi qu'un état de l'art sur les différents travaux de recherche menés sur les systèmes PV/PAC au cours des années passées afin de faire une introduction sur les sources d'énergie des systèmes hybride solaire/hydrogène.

Des descriptions détaillées des modèles de composants individuels nécessaires pour simuler un système hybride PV/PAC sont présentées dans le chapitre deux. Ces modèles sont principalement basés sur des relations électriques et électrochimiques. Cependant, un certain nombre de relations empiriques pour certains modèles sont également utilisées. Les modèles de générateur PV, de pile à combustible PEM, d'électrolyseur à eau alcaline et d'unités de conditionnement de puissance sont discutés en détail, tandis que le réservoir de stockage est présenté par un modèle simple.

La modélisation, l'identification et la validation des modèles de composants montrent que la concordance entre les données simulées et les données trouvées par expérience reportée dans la littérature est très bonne. Plusieurs simulations à court terme sont effectuées, de sorte que les caractéristiques I-V, les taux de production et de consommation d'hydrogène et d'autres processus physiques des modèles de composants individuels sont correctement évalués.

Une stratégie de gestion optimale du flux de puissances des différentes sources énergétiques entrant en jeu dans le système PV/PAC est proposée à la fin du deuxième chapitre.

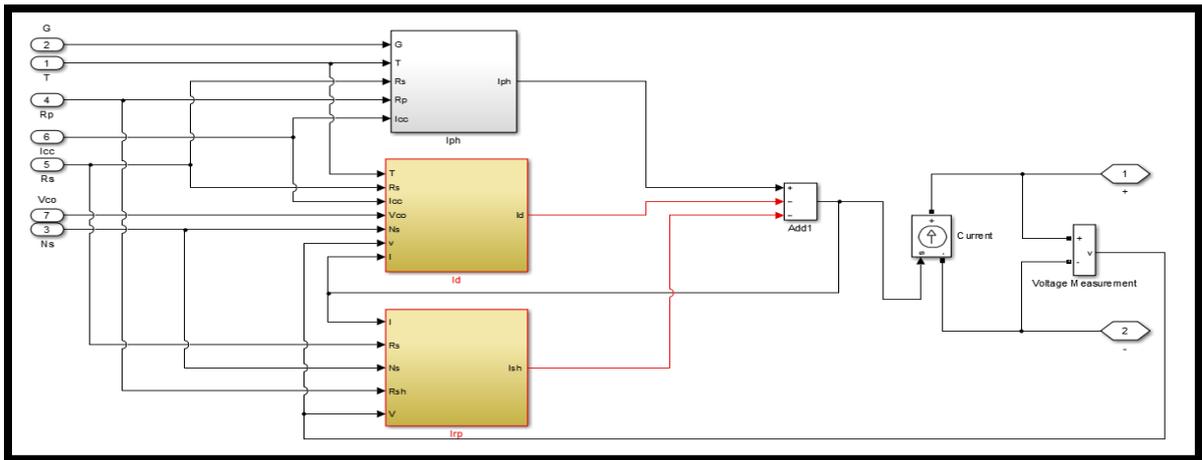
Dans le chapitre trois, des études de simulation ont été effectuées pour vérifier les performances du système selon différents scénarios en utilisant un profil de charge pratique et des données météorologiques extraites du site du centre de développement des énergies renouvelable (CDER). Les résultats montrent que la stratégie de gestion de la puissance globale est efficace ; par conséquent le flux énergétique entre les différentes sources d'énergie et la demande de la charge est équilibrée.

Le retour d'expériences sur les systèmes autonome PV/PAC recommande d'installer ces systèmes sur des sites bien exposés au rayonnement solaire, ainsi que l'utilisation d'un super-condensateur ou d'une batterie pour répondre au changement brusque de la demande de charge.

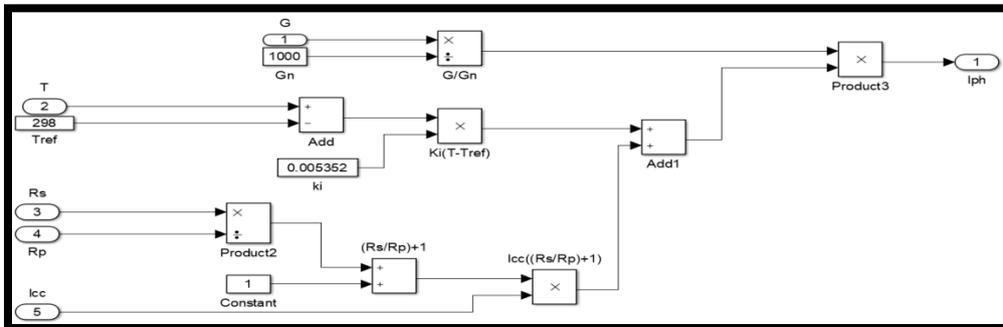
ANNEXE

Schéma de simulation

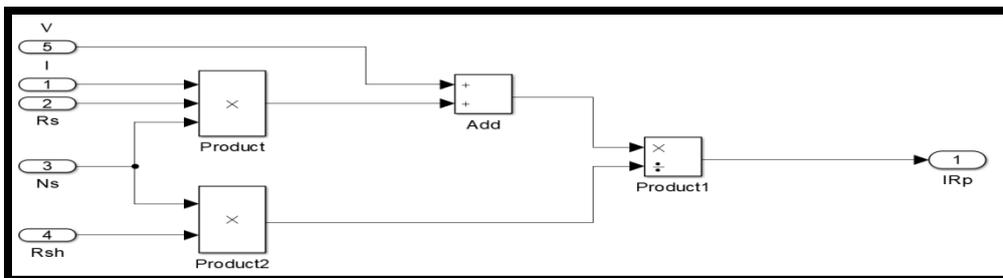
1. Panneau photovoltaïque



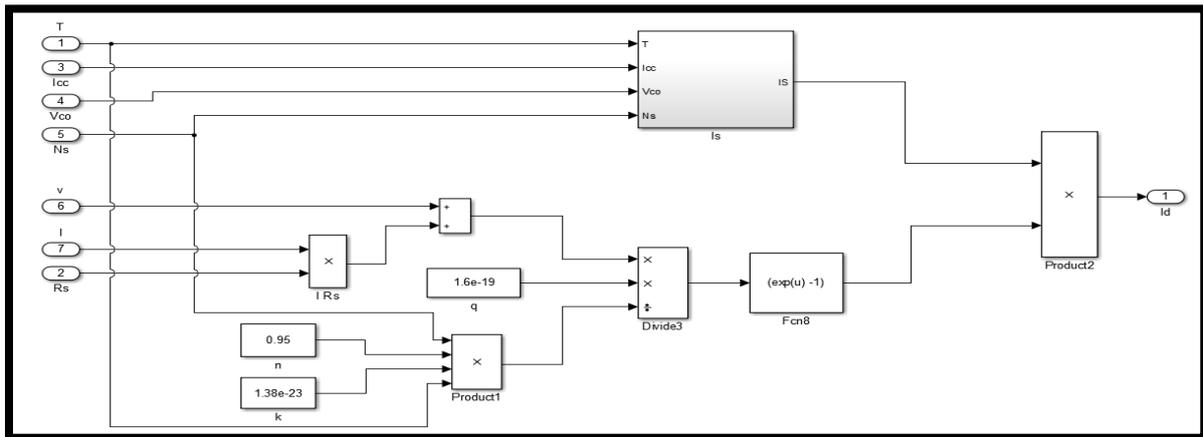
Module photovoltaïque.



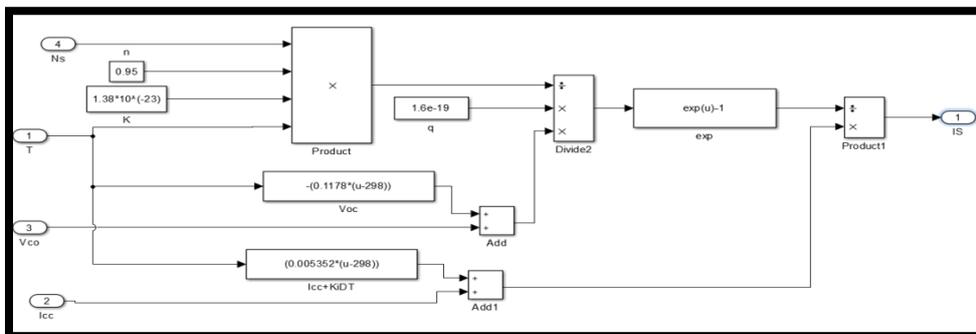
Le courant photo-généré Iph.



Le courant dans la résistance parallèle

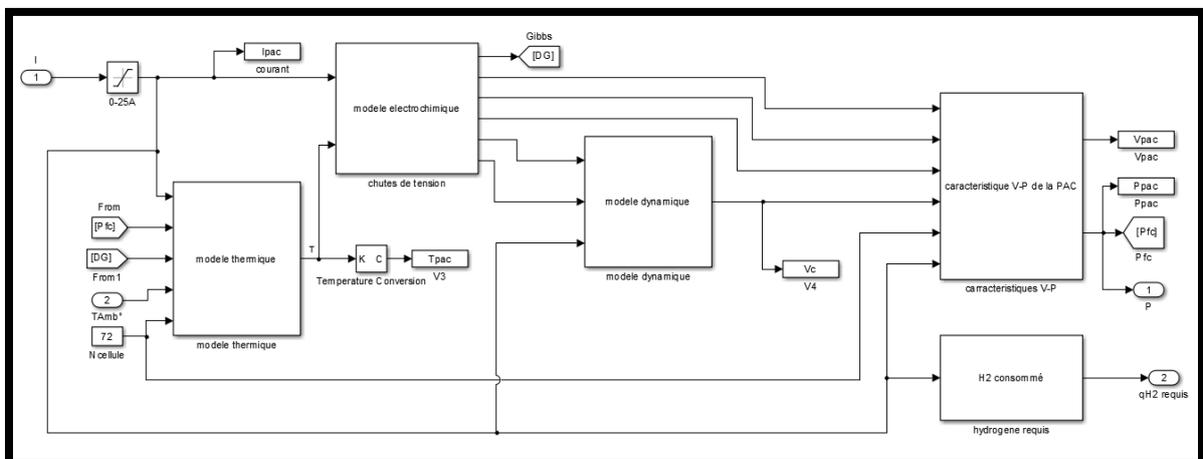


Courant dans la diode Id.

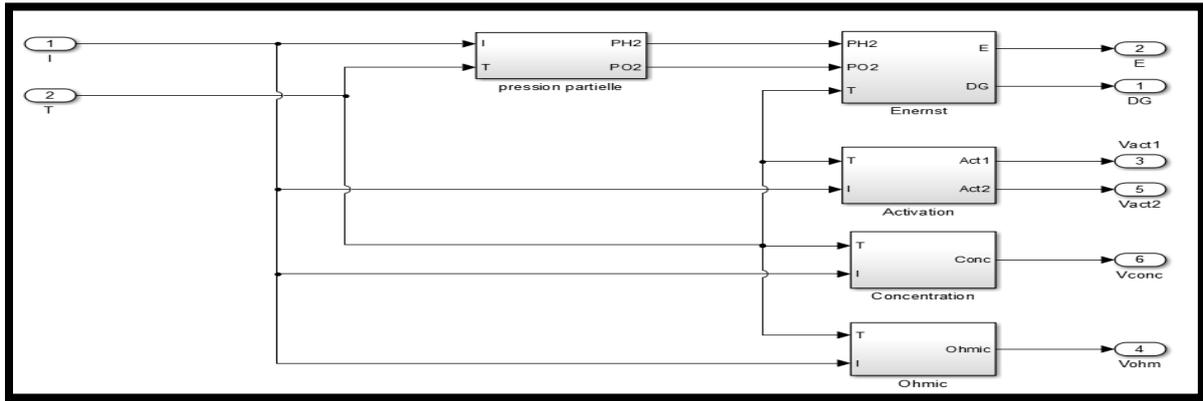


Le courant de saturation de la diode.

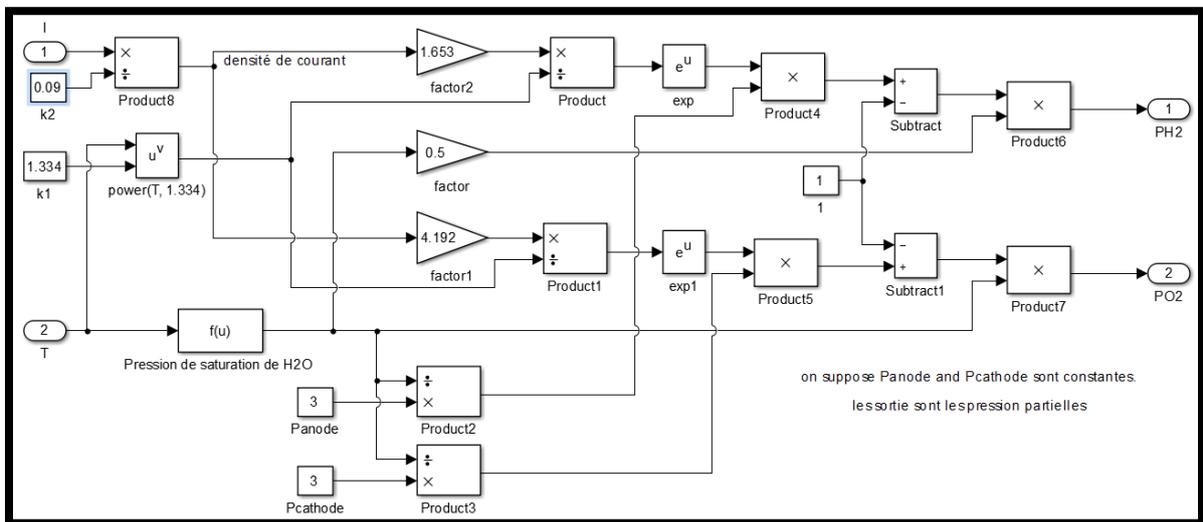
d. Pile à combustible PEMFC



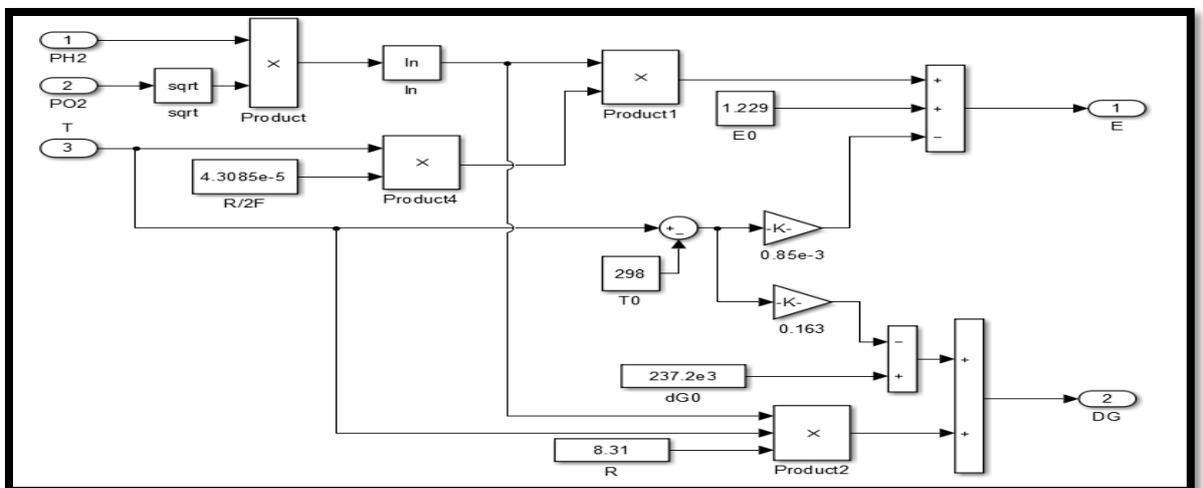
La PEMFC



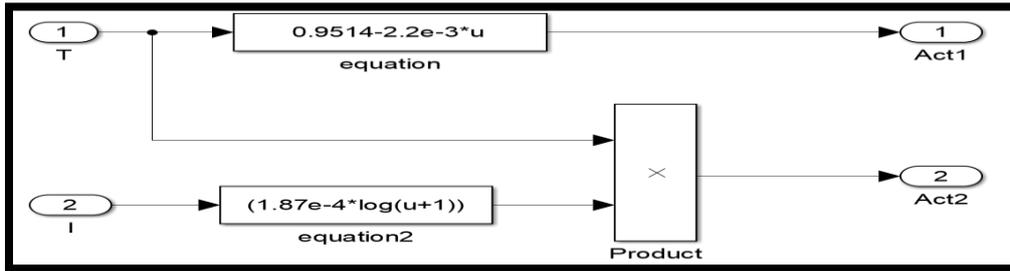
Modèle électrochimique



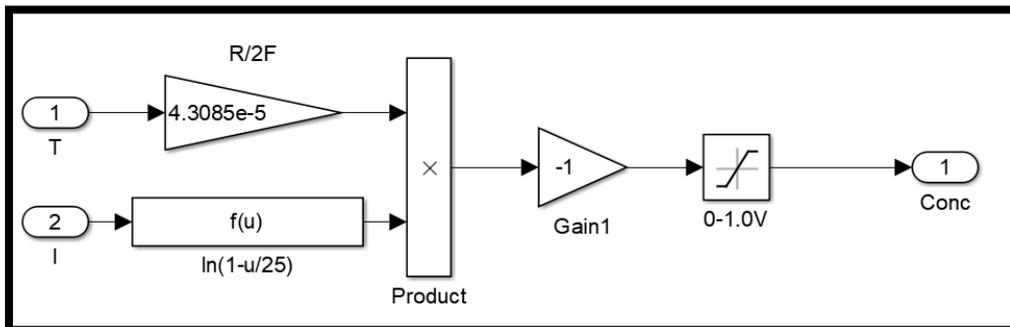
Les pressions partielles.



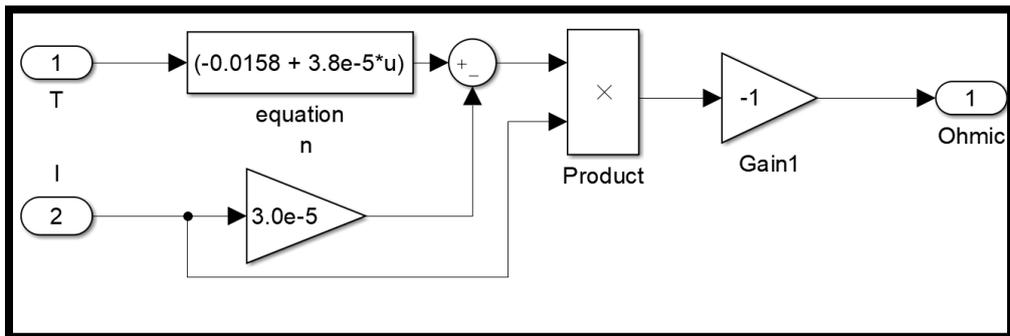
Le Potentiel de Nernst



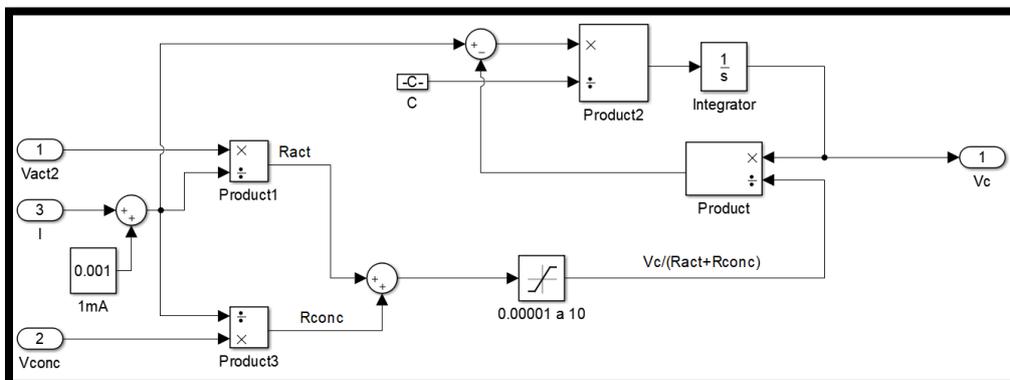
Chute de tension d'activation.



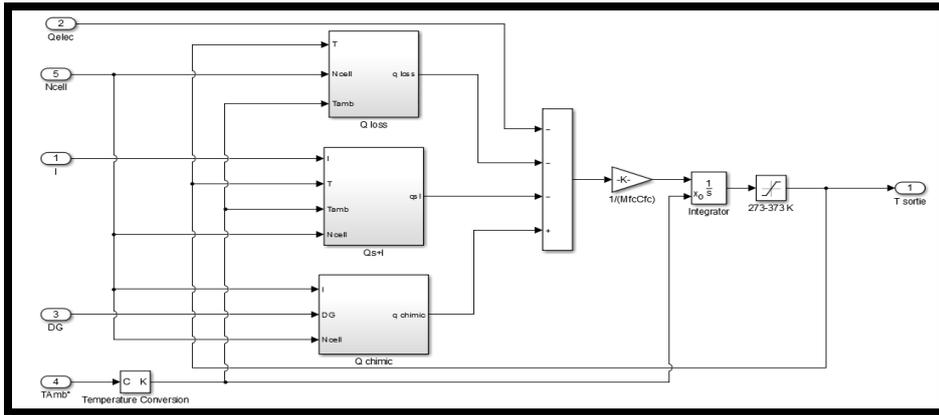
Chute de tension de concentration.



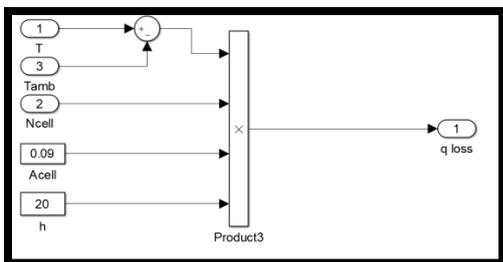
Chute de tension ohmique.



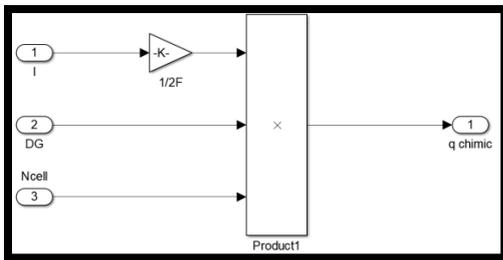
Modèle dynamique



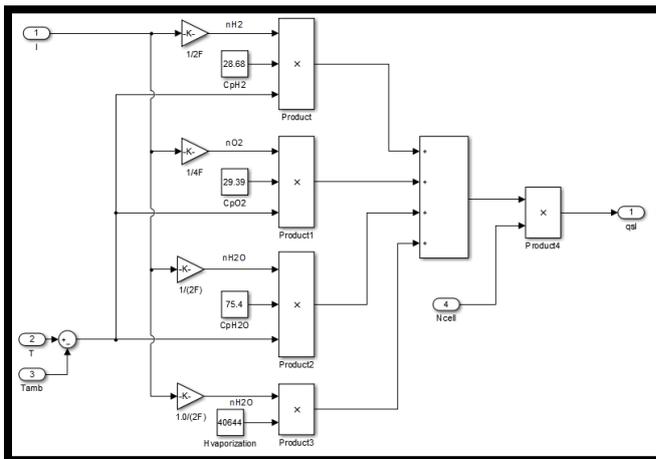
Modèle thermique



Pertes de chaleur.

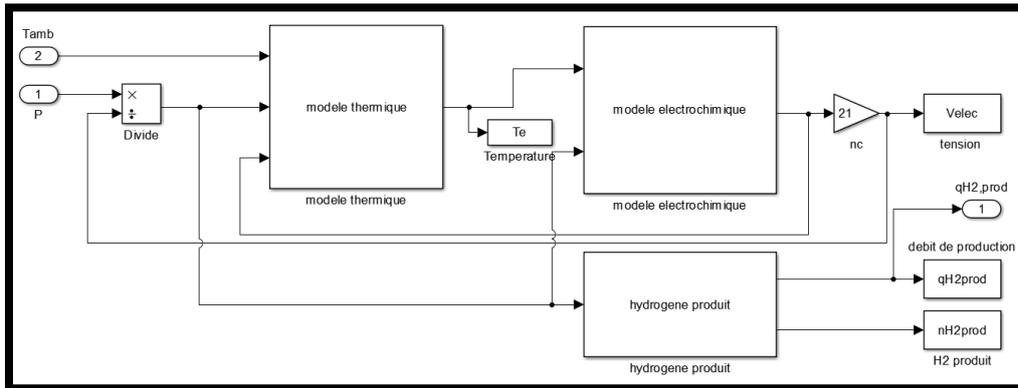


Chaleur de la réaction chimique

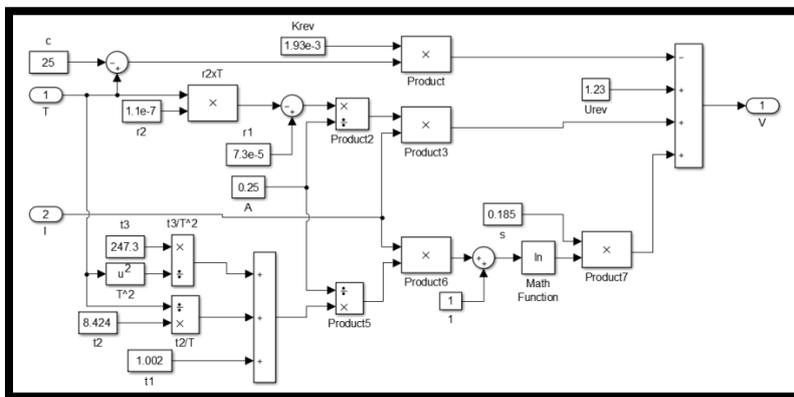


10 Chaleur sensible + latente

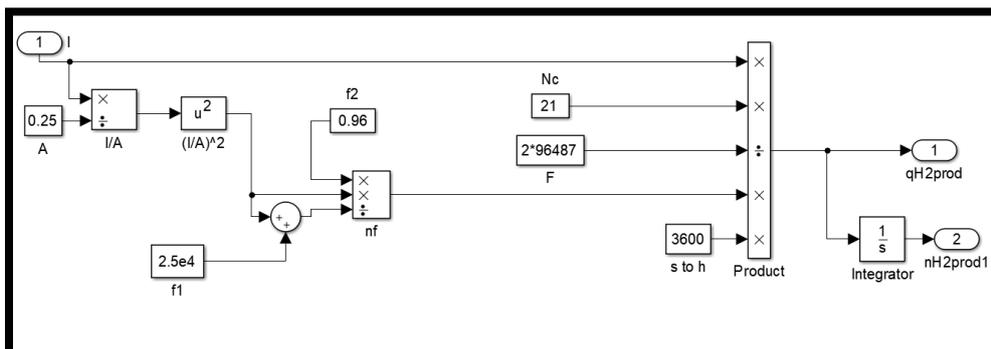
e. Electrolyseur alcalin



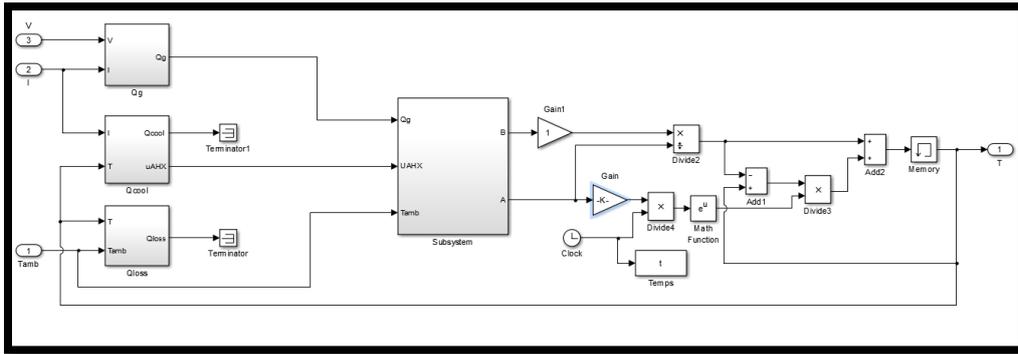
Electrolyseur alcalin



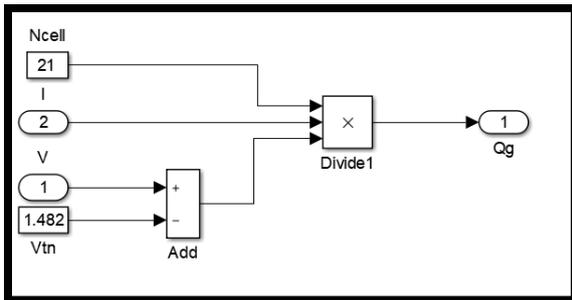
Modèle électrochimique



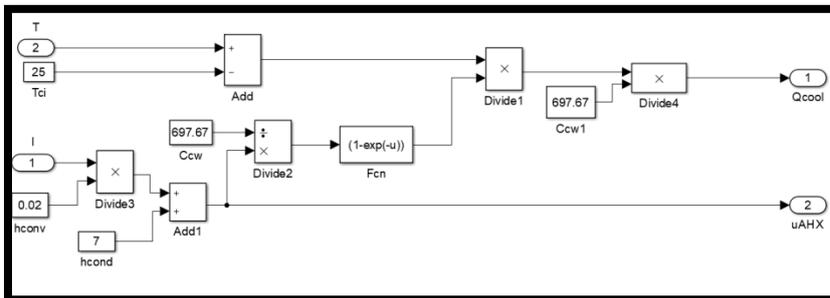
Taux de production d'hydrogène



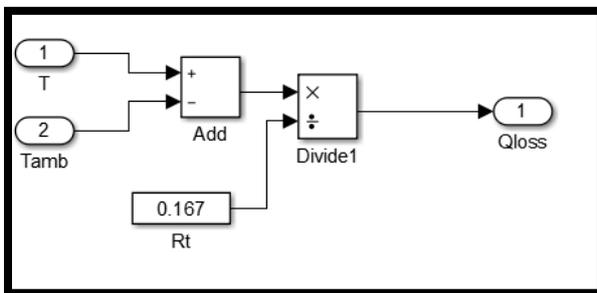
Modèle thermique



Chaleur générée

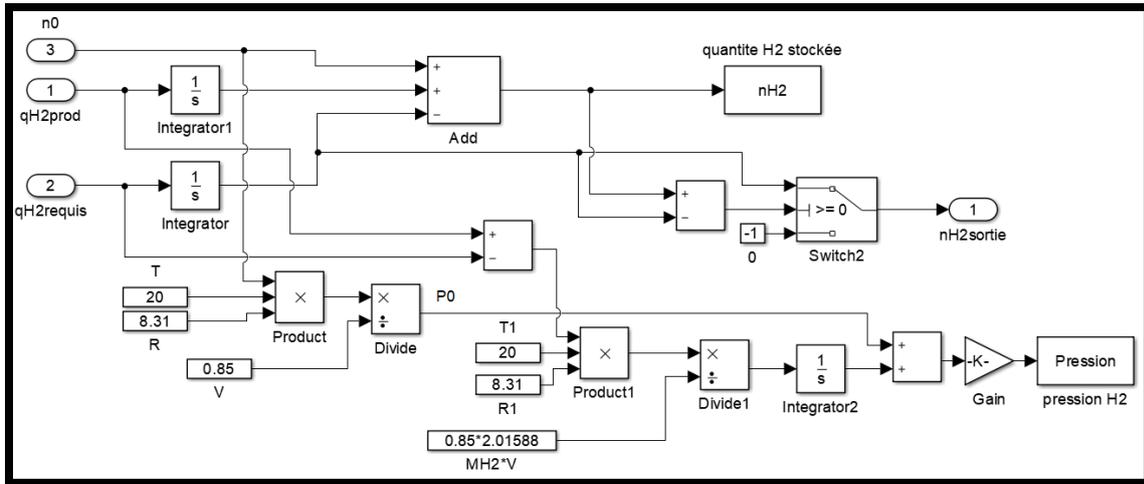


Pertes de chaleur par refroidissement



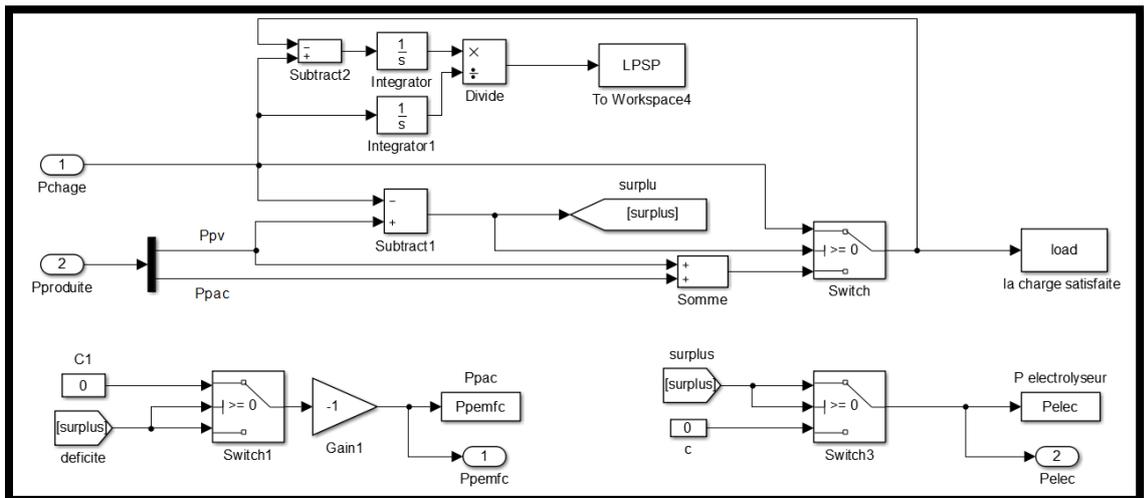
Pertes de chaleur

f. Réservoir d'hydrogène



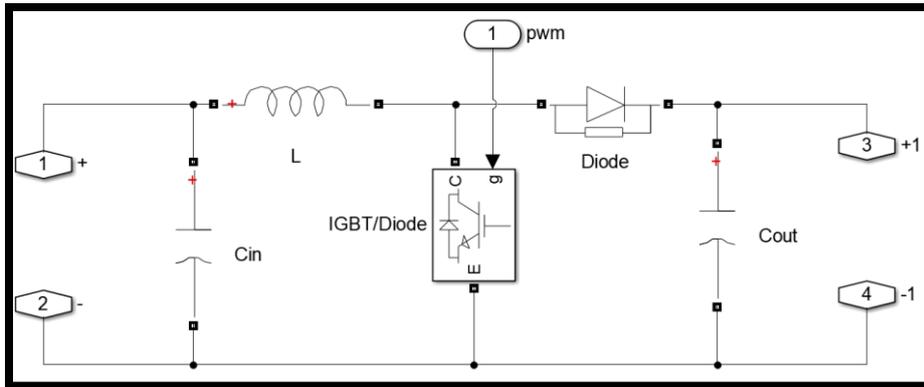
Réservoir d'H2

g. Système de gestion optimale de l'énergie

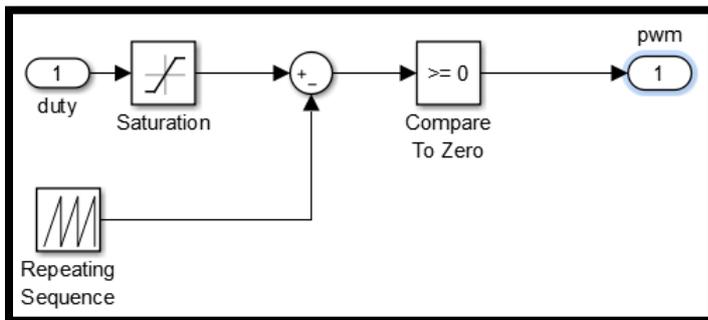


La gestion d'énergie.

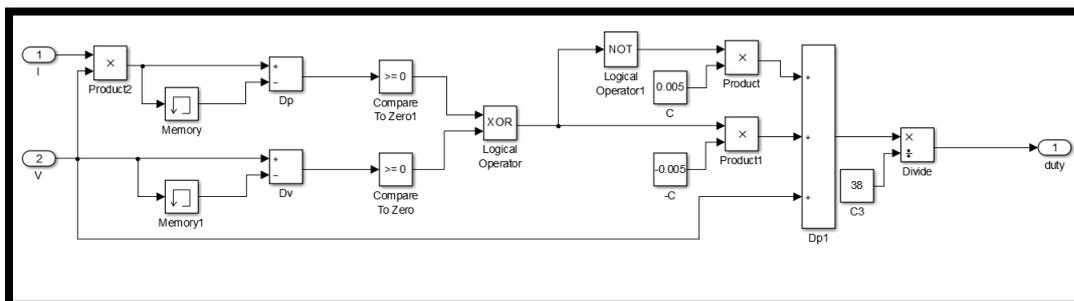
h. Le convertisseur DC-DC



Le hacheur BOOST



Le PWM (MLI)



La commande MPPT (P&O).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

- [1] S.Rahman, K.Tam. « A feasibility study of photovoltaic-fuel cell hybrid energy system ». *IEEE Trans. Energy Convers.* 1988, 3, 50–55.
- [2] D.Rekioua, S.Bensmail, N.Bettar. « Development of hybrid photovoltaic-fuel cell system for stand-alone application ». *Int. J. Hydrog. Energy* 2014, 39, 1604–1611.
- [3] G.Bayrak, C.Mehmet. « Grid connected fuel cell and PV hybrid power generating system design with Matlab Simulink ». *Int. J. Hydrog. Energy* 2014, 39, 8803–8812.
- [4] 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*.
- [5] C.Ghenai, T.Salameh, A.Merabet. « Technico-economic analysis of off grid solar PV/ Fuel cell energy system for residential community in desert region ». *Int. J. Hydrog. Energy* 2018.
- [6] J.Kupecki, K.Motyliniski, S.Jagielski, M.Wierzbicki, J.Brouwer, Y.Naumovich et al. « Energy analysis of a 10 kW-class power-to-gas system based on a solid oxide electrolyzer (SOE) ». *Energy Convers Manage* 2019 Nov;1(199):111934.
- [7] Mosayeb Bornapour, Reza Hemmati, Motahareh Pourbehzadi, Aliakbar Dastranj, Taher Niknam. « 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 (2020) 112495.
- [8] Yanpeng Wu, Ying Wu, Josep M. Guerrero, Juan C. Vasquez, Emilio José Palacios-García, Yajuan Guan. « IoT-enabled Microgrid for Intelligent Energy-aware Buildings : A Novel Hierarchical Self-consumption Scheme with Renewables ». *Electronics* 2020, 9, 550.
- [9] Liang Luo, Sarkew S. Abdulkareem, Alireza Rezvani, Mohammad Reza Miveh, Sarminah Samad, Nahla Aljojo, Mehdi Pazhoohesh « Optimal scheduling of a renewable based microgrid considering photovoltaic system and battery energy storage under uncertainty », *Journal of Energy Storage* 28 (2020) 101306

- [10] Shakti Singh, Prachi Chauhan, MohdAsimAftab, Ikbali Ali, S. M. Suhail Hussain, Taha Selim Ustun. « CostOptimization of a Stand-AloneHybridEnergy System with Fuel Cell and PV ». *Energies* 2020, 13, 1295.
- [11]Morney thomas, Vernay Alexis, Volle Marion « les cellules photovoltaïques », 2005.
- [12]Pierre Bessemoulin et jean oliviéri « le rayonnement solaire et sa composante ultraviolet », *La Météorologie* 8^e serie –n°31 septembre 2000, 2-4.
- [13]Anne Labouret& col « les bases de l'énergie photovoltaïque», *Cellules solaires* 5^e Edition, 2005, 19-21.
- [14] C. Deline, « Partiallyshadedoperation of a grid-tied PV system », 34th IEEE photovoltaicspecialistsconference, Philadelphia, June 7–12, (2009).
- [15] A.Ould Mohamed Yahya, A.Ould Mahmoud et I. Youm.« Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque ». Centre d'Etudes et de Recherches sur les Energies Renouvelables 'CERER', B.P. 476, Dakar, Sénégal, 2008.
- [16] GitanjaliMehta, Vinod Kumar Yadav. « Design of Photovoltaic and Fuel CellsbasedDistributedGeneration System : Entire System Survey ». 2018 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON) GalgotiasUniversity, GreaterNoida, UP, India. Sep 28-29, 2018.
- [17] Loc Nguyen Khanh, Jae-Jin Seo, Yun-Seong Kim, and Dong-Jun Won.« Power-Management Strategies for a Grid-Connected PV-FC Hybrid System ». *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, VOL. 25, NO. 3, JULY 2010.
- [18] Kuldeep Singh Rathode, Santosh Kr Sharma, SurbhiShringi. « Performance Analysis of PV & Fuel cellbasedGrid Integrated Power System ». *Proceedings of the Fourth International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES 2019)*.
- [19] N. Aouchiche, M.S. Aït Cheikh et A. Malek. « Poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque par les méthodes de l'incrémentation de conductance et la perturbation & observation ». *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 16 N°3 (2013).

- [20] Ahmad Haddad, Rachid Bouyekhf, Abdellah El Moudni. « Modélisation dynamique non linéaire d'une cellule de pile à combustible du type PEM : Effet de l'humidification de la membrane électrolytique ». Laboratoire Système et Transport, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard.
- [21] F.Z. Zerhouni, M.Zegrar, M.T.Benessaoud,A.BoudgheneStambouli.« Etude du transfert d'énergie pile à combustible/charge ».2011.
- [22] HATTI Mustapha. « Contribution à l'Étude des Systèmes Hybrides Photovoltaïque/Pile à Combustible ». Thèse Doctorat Es Science, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran "Mohamed Boudiaf", 2010.
- [23] Aliasger Zaidi, PoojaPokharkar, Rajesh Krishnan, DayaramSonawane. « DynamicModeling and Simulation of A PEM Fuel Cell: MATLAB and Lab VIEW ModelingApproach ». Proceedings of 2014 1st International Conference on Non ConventionalEnergy (ICONCE 2014).
- [24] A. Khalilnejad, A. Sundararajan, A.I. Sarwat.« Performance Evaluation of Optimal Photovoltaic-Electrolyzer System with the Purpose of Maximum Hydrogen Storage ». 2016-ESC-0074.
- [25] YasuhitoHidaka, Koji Kawahara. « Modeling of a Hybrid System of Photovoltaic and Fuel cell for OperationalStrategy in Residential Use ».47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC).2012.
- [26] Nabil Tlili, BechirNeily, Fatma Ben Salem. « Modeling and Simulation of Hybrid System Coupling a PhotovoltaicGenerator, a PEM Fuel Cell and an Electrolyzer (Part II) ». IEEE 11th International Multi-Conference on Systems, Signals&Devices (SSD14).2014.
- [27] Nabil Tlili, BechirNeily and Fatma Ben Salem. « Modeling and Simulation of Hybrid System Coupling a PhotovoltaicGenerator, a PEM Fuel Cell and an Electrolyzer (Part I) ». IEEE 11th International Multi-Conference on Systems, Signals&Devices (SSD14).2014.
- [28] F. Amrouche, B. Mahmah, M. Belhamel et H. Benmoussa. « Modélisation d'une pile à combustible PEMFC alimentée directement en hydrogène-oxygène et validation expérimentale ». Rev. Energ. Ren. Vol. 8 (2005) 109 – 121.

- [29] Carlos Restrepo, Carlos Torres, Javier Calvente, Roberto Giral, Ramón Leyva. « Simulator of a PEM Fuel-Cell Stack Based on a Dynamic Mode » IEEE. 2009.
- [30] Yancheng Xiao, Kodjo Agbossou. « Interface Design and Software Development for PEM Fuel Cell Modeling based on Matlab/Simulink Environment ». World Congress on Software Engineering. IEEE. 2009
- [31] PIERRE MILLET. « Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau sur membrane acide ». Découverte n° 343 décembre 2006.
- [32] Nadir Bellal, M. Sahli « Hydrogen production by electrolysis of brine using a source of renewable energy ». International Review of Physics (I.R.E.PHY.), Vol. 5, N. 4 August 2011.
- [33] Caisheng Wang, M. Hashem Nehrir, Steven R Shaw. « Dynamic Models and Model Validation for PEM Fuel Cells Using Electrical Circuits ». IEEE Transactions on Energy Conversion, Juin 2005.
- [34] Damien Guilbert, Gianpaolo Vitale. « Experimental validation of an equivalent dynamic electrical model for a proton exchange membrane electrolyzer ». IEEE. 2018.
- [35] S. Boulmrharj, R. Rabeh, V. Felix, R. Ouladsine, M. Bakhouya, K. Zine-dine, M. Khaidar, M. Siniti, R. Abid. « Modeling and Dimensioning of Grid-Connected Photovoltaic Systems ». Conference Paper December 2017.
- [36] Djoudi H, Badji A, Benyahia N, Zaouia M, Denoun H, Benamrouche N. « Modeling and Power Management Control of the Photovoltaic and Fuel Cell/Electrolyzer System for Stand-Alone Applications ». IEEE. 2015.
- [37] Phatiphat Thounthong. « Conception d'une source hybride utilisant une pile à combustible et des supercondensateurs ». Thèse doctorat de l'INPL. L'Institut National Polytechnique de Lorraine. 2005.
- [38] Halim Eddahbi, Mohamed Khafallah. « Modeling and Simulation of a PV Monocrystalline Panel Performances under Real Environmental Conditions ». IEEE. 2019.

- [39] Abou El-MaatyMetwallyMetwally Aly Abd El-Aal, « Modelling and Simulation of a Photovoltaic Fuel CellHybrid System », A Dissertation in Candidacy for the Degree of Doctor in Engineering, Faculty of Electrical Engineering University of Kassel.2005.
- [40] ØysteinUlleberg « Modeling of advancedalkalineelectrolyzers: a system simulation approach », International Journal of HydrogenEnergy, 28 (2003).
- [41]Pascal Robinet, « Stockage électrochimique : du système à l'intégration », ConférenceDERBI /JNES Perpignan, 14 juin 2017.
- [42]<http://data.cder.dz:81/>