



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
People's Democratic Republic OF Algeria
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTRY OF HIGHER EDUCATION AND SCIENTIFIC RESEARCH
جامعة الشهيد الشاذلي بن جديد - تبسة
Echahid Cheikh Larbi Tebessi University-Tebessa



كلية العلوم و التكنولوجيا

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

MEMOIRE

DE FIN D'ETUDES POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER EN

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

THEME

**Etude et Modélisation d'un Système Hybride Photovoltaïque
Pile à combustible pour une fonction de Cogénération
Energie Electrique-Hydrogène**

Présenté par le binôme :

- Zerfaoui Chahra zed
- Abdi Hassiba

Devant le jury :

| | | |
|--------------------------|------|-----------|
| - Mr Abdelhakim bendakir | MCB | Président |
| - Mr Djebbar med salah | MCB | Examineur |
| - Mr Dib Djalel | Prof | Encadreur |

2022/2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Avant tous, nous tenons nos remerciements à notre Dieu ALLAH de nous avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail.

Je tiens, tout particulièrement, à exprimer ma profonde gratitude à Mr Dib Djalel Professeur à l'université de Tébessa, d'avoir dirigé de manière agréable notre travail ; ses compétences scientifiques, ses conseils et ses qualités humaines ont largement contribué à l'aboutissement de ce travail.

Et tous les professeurs du département de Génie électrique qui ont participé à notre parcours de formation universitaire.

Nos sincères remerciements aux membres de jury Dr Bendakir A.H et Dr Djebbar M.S qui ont accepté d'examiner notre mémoire de fin d'étude.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours soutenu et encouragé au cours de l'élaboration de ce mémoire.

Merci à tous et à toutes.

Dédicace

J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail.

*A ma très chère mère, qui me donne toujours l'espoir de vivre et
qui n'a jamais cessé de prier pour moi.*

*A mon très cher père, pour ses encouragements, son soutien,
surtout pour son amour et son sacrifice afin que rien n'entrave
le déroulement de mes études*

*Mes frères ,surtout Imad ,qui était avec moi ont marqué ma
carrière*

Mes sœurs et Malak

*A mes meilleurs amis. Chahra zed, Hanine, Nadjet, Ilham,
Sabrina, Amina et a tous mes aîmes*

Et tout qui m'aide et compulse ce modeste travail

*En fin, je remercie mon binôme, Chahra zed, qui a contribué à la
réalisation de ce modeste travail*

Hassiba

Dédicace

J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail.

*A ma très chère mère, qui me donne toujours l'espoir de vivre et
qui n'a jamais cessé de prier pour moi.*

*A mon très cher père, pour ses encouragements, son soutien,
surtout pour son amour et son sacrifice afin que rien n'entrave
le déroulement de mes études*

*Mes frères (Walid, Chaouki, adel) et ,Mes sœurs(Nana, Hala,
Abir et Louza)*

*A mes amis proches .(Hanine, Nadjjet,Ilham, Marwa ,Hassiba)
et tous mes aimés*

Et à tout celui qui m'a aidé à confisquer ce modeste travail

Chahrazed

Liste des Figures

| N° | Titre | Page |
|--------------|--|------|
| Figure I.1 | Densité d'énergie massique pour différents Vecteurs d'énergie | 18 |
| Figure I.2 | Synthèse de la filière hydrogène | 19 |
| Figure I.3 | Les différents modes de production de l'hydrogène | 20 |
| Figure I.4 | Système synoptique de production de l'hydrogène solaire | 22 |
| Figure I.5 | Capacités volumique et gravimétrique de candidat réel ou Potentiel au stockage de l'hydrogène , d'après Züttel . | 22 |
| Figure I.6 | Description du système PV-PAC | 26 |
| Figure I.7 | Présentation schématique d'une cellule solaire. | 27 |
| Figure I.8 | Types de cellules photovoltaïques | 28 |
| Figure I.9 | Principe de fonctionnement d'une pile à combustible | 30 |
| Figure I.10 | Fonctionnement d'une pile à combustible | 30 |
| Figure I.11 | Caractéristique électrique d'une cellule de pile à combustible | 31 |
| Figure I.12 | Pile Type PEMFC | 33 |
| Figure I.13 | Photographie d'un assemblage | 36 |
| Figure I.14 | Vue éclatée d'une cellule de PEM | 36 |
| Figure I.15 | L'électrolyse de l'eau. | 37 |
| Figure I.16 | Irréversibilités présentes dans une cellule d'électrolyse | 38 |
| Figure I.17 | Influence de la température sur la tension de cellule d'un électrolyseur alcalin | 39 |
| Figure I.18 | Influence de la pression sur la tension de cellule d'un électrolyseur alcalin à technologie 'zéro gap' | 39 |
| Figure I.19 | Influence de la pression et de l'intensité sur la pureté des gaz produits par électrolyse alcaline. | 40 |
| Figure I.20 | Electrolyse alcaline | 41 |
| Figure II.1 | circuit équivalent à une diode d'une cellule PV | 44 |
| Figure II.2 | Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ dans les conditions standards | 45 |
| Figure II.3 | Caractéristique de P_{pv} en fonction de la tension V_{pv} d'un panneau solaire | 47 |
| Figure II.4 | Algorithme de la méthode P&O | 47 |
| Figure II.5 | Simulation d'un panneau PV avec la commande MPPT | 48 |
| Figure II.6 | Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$ | 48 |
| Figure II.7 | Influence de la température sur la caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ | 48 |
| Figure II.8 | Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ | 49 |
| Figure II.9 | Influence de l'éclairement sur la caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ | 49 |
| Figure II.10 | Effet de la commande MPPT sur la puissance du panneau PV | 50 |
| Figure II.11 | Effet de la commande MPPT sur la tension du panneau PV | 50 |
| Figure II.12 | Effet de la commande MPPT sur le courant du panneau PV | 50 |
| Figure II.13 | Simulation d'un électrolyseur sous Matlab/Simulink | 54 |
| Figure II.14 | Caractéristique V-I d'électrolyseur | 54 |
| Figure II.15 | Caractéristique variation du débit d'hydrogene avec le courant entrant $I_{-nH2pro}$ par l'électrolyseur | 55 |
| Figure II.16 | Influence de la température sur la caractéristique I-V de l'électrolyseur | 55 |
| Figure II.17 | Modèle R-C de la batterie | 56 |
| Figure II.18 | schéma de hacheur type boost | 57 |
| Figure III.1 | Caractéristique de polarisation théorique du PAC | 60 |
| Figure III.2 | Modèle statique simplifié de la pile à combustible (PEMFC) | 62 |
| Figure III.3 | Illustration d'un orifice | 64 |
| Figure III.4 | Simulation d'une pile à combustible PEMFC. | 65 |
| Figure III.5 | Caractéristique $V(I)$ et $P(I)$ | 66 |

| | | |
|---------------|---|----|
| Figure III.6 | Caractéristique I(t) | 66 |
| Figure III.7 | Caractéristique V(t) | 66 |
| Figure III.8 | Caractéristique P(t) | 67 |
| Figure III.9 | simulation d'un pile à combustible par command MPPT | 67 |
| Figure III.10 | Tension de pile par command MPPT | 67 |
| Figure III.11 | courant de pile par command MPPT | 68 |
| Figure III.12 | puissance de pile par command MPPT | 68 |
| Figure III.13 | Composition de la fonction du régulateur | 69 |
| Figure III.14 | Correcteur directement en cascade avec les autres éléments | 69 |
| Figure III.15 | Correction à actions proportionnelle | 70 |
| Figure III.16 | la réponse indicielle du correcteur P et Entrée et sortie du correcteur P | 70 |
| Figure III.17 | Correction à actions intégrale | 71 |
| Figure III.18 | la réponse indicielle correcteur Intégrale | 71 |
| Figure III.19 | Correction à actions dérivée | 72 |
| Figure III.20 | Réponses à un échelon et à une rampe du correcteur D. Entrée et sortie du correcteur à action dérivée (D) | 72 |
| Figure III.21 | Correction à actions proportionnelle, intégrale et dérivée (PID) | 73 |
| Figure III.22 | Réponses indicielle : Entrée et sortie du correcteur à actions proportionnelle, intégrale et dérivée | 74 |
| Figure III.23 | Simulation d'un pile à combustible avec PI | 74 |
| Figure III.24 | Caractéristique P(t) | 75 |
| Figure III.25 | Caractéristique I(t) | 75 |
| Figure III.26 | Caractéristique V(t) | 75 |
| Figure IV.1 | Simulation du système hybride PV-H2-PAC | 78 |
| Figure IV.2 | Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$, $P_{pv} = f(V_{pv})$ | 78 |
| Figure IV.3 | Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$, $P_{pv} = f(V_{pv})$ | 79 |
| Figure IV.4 | Effet de la commande MPPT sur la puissance du panneau PV | 79 |
| Figure IV.5 | Effet de la commande MPPT sur la tension du panneau PV | 79 |
| Figure IV.6 | Effet de la commande MPPT sur le courant du panneau PV | 79 |
| Figure IV.7 | Caractéristique V-I d'électrolyseur | 80 |
| Figure IV.8 | caractéristique variation du débit d'hydrogene avec le courant entrant $I_{-nH2pro}$ par l'électrolyseur | 80 |
| Figure IV.9 | influence de la température sur la caractéristique I-V de l'électrolyseur | 80 |
| Figure IV.10 | Caractéristique V(I) et P(I) | 80 |
| Figure IV.11 | Caractéristique I(t) | 81 |
| Figure IV.12 | Caractéristique V(t) | 81 |
| Figure IV.13 | Caractéristique P(t) | 81 |
| Figure IV.14 | Tension de pile par command MPPT | 81 |
| Figure IV.15 | courant de pile par command MPPT | 82 |
| Figure IV.16 | puissance de pile par command MPPT | 82 |
| Figure IV.17 | Caractéristique P(t) | 82 |
| Figure IV.18 | Caractéristique I(t) | 83 |
| Figure IV.19 | Caractéristique V(t) | 83 |

Liste des tableaux

| N° | Titre | Page |
|----------------|---|------|
| Tableau. I.1 | Les différents types de réservoirs gazeux | 23 |
| Tableau. I.2 | Les différents groupes de stockage solide | 24 |
| Tableau. II.1 | Paramètres caractéristiques du panneau photovoltaïque utilisé dans le système | 46 |
| Tableau. II.2 | Paramètres électrique d'un électrolyseur | 53 |
| Tableau.III..1 | Paramètres du modèle | 65 |
| Tableau. III.2 | Effets des correcteurs P, I, et D sur les régimes statique et dynamique du système en boucle fermée | 74 |

Listes des notation et symboles

| | | |
|--|---|--|
| | Titre | |
| PV | Panneau photovoltaïque | |
| PAC | Pile à Combustible | |
| PV/PAC | Système à base d'un Panneau photovoltaïque, et une pile à combustible | |
| STC | Standard Test Conditions) | |
| PEMFC | Pile à Combustible à membrane échangeuse de protons (Polymer Exchange Membran Fuel Cell) | |
| SOFC | SolideOxide Fuel Cell | |
| PAFC | PhosphoricAcid Fuel Cell | |
| MCFC | Molten Carbonate Fuel Cell | |
| AFC | Alkaline Fuel Cell | |
| DMFC | Direct Methanol Fuel Cell | |
| PV/ElctysH ₂ /PàC | Système à base d'un Panneau photovoltaïque , électrolyseur et une pile à combustible | |
| I _{ph} | la photo courant | [A] |
| I _{rsh} | courant qui circule dans la résistance parallèle | [A] |
| I _d | le courant de la diode | [A] |
| I ₀ | courant de saturation de la diode | [A] |
| Q | charge élémentaire (1.6.10-19 C) | |
| K | constante de Boltzmann (1.38.10-23(SI)) | |
| N | Factor idéalité de la diode | |
| N _s | nombre de cellules | |
| I ₀ | courant de saturation de la diode | [A] |
| E _{g0} | l'énergie de gap du semi-conducteur utilisé dans la cellule en électronvolt [eV] | |
| I _{rs} | Le courant de saturation I _{rs} de la diode pour la température T _n | [A] |
| V _{oc} | la tension en circuit ouvert | [V] |
| R _s | Résistance série | [Ω] |
| R _p | Résistance en parallèle | [Ω] |
| G _n , T _n | Conditions STC | |
| I _{cc} | Courant de court-circuit | [A] |
| K _i , K _v | Coefficient de température | |
| V _{élec_Cell} | la tension aux bornes de la cellule | [V] |
| V _{rév} | la tension réversible de cellule | |
| r ₁ , r ₂ | les paramètres de résistance ohmique | [Ω. m ² , Ω. m ² /°C] |
| K _{elé} , K _{T1} , K _{T1} , K _{T1} | les paramètres de surtension V | [m ² /A, m./A, m ² ./A] |
| ΔG | L'énergie libre de la réaction d'électrolyse | [J/mol] |
| F | La constante de Faraday | [96.487 C/K.mol] |
| V _{rév} ⁰ | La tension de cellule réversible à l'état standard | [V] |
| K _{rév} | Coefficient empirique de température | [V/°C] |
| ñ _{H₂} | Débitde production d'Hydrogène | [mole/sec] |
| f ₁ , f ₂ | Paramètres de calcul du rendement Faradique | [mA ² cm ⁻⁴] |
| R _t | Résistance thermique de l'électrolyseur | [°C/W] |
| T _a | La température ambiante | [°C] |
| C _{cm} | La capacité thermique de l'eau de refroidissement | [J/°C] |
| T _{cm,e} | La température de l'eau de refroidissement d'entrée | [°C] |
| T _{cm,s} | La température de l'eau de refroidissement de sortie | [°C] |

| | | |
|------------------------------|--|----------------------|
| V_{AHX} | Coefficient d'échange calorifique effective pour le processus de refroidissement | |
| h_{cond} | Coefficient relatif à l'échange de chaleur en conduction | [W/°C] |
| h_{conv} | Coefficient relatif à l'échange de chaleur en convection | [W/°C] |
| U_{rev} | Tension réversible de la cellule | [V] |
| K_{rev} | Coefficient de température | |
| s, t_1, t_2, t_3 | Paramètres de surtension | [°C ² /A] |
| A | Surface effective | [m ²] |
| P et V_m | Sont respectivement la pression et le volume molaire | |
| Q_d | La quantité de charge manquante par rapport à C_{bat} | |
| C_{bat} | La capacité (Ah) nominale de la batterie | |
| a | Le rapport cyclique | |
| MPPT | Algorithme de poursuite de point de puissance maximale | |
| P & O | Méthode de perturbation et observation | |
| P | Correcteur à action proportionnelle | |
| I | Correcteur à action intégrale | |
| D | Correcteur à action dérivée | |
| PI | Correcteur à actions proportionnelle et intégrale | |
| PID | Correcteur à actions proportionnelle, intégrale et dérivée | |
| E_{nerst} | Dite tension réversible | |
| P_{H_2}, P_{O_2} | Sont respectivement les pressions partielles de hydrogène et l'oxygène | [atm] |
| ΔG | Le changement d'énergie libre | [J/K.mol] |
| T | La température absolue opérationnelle | [°C] |
| T_{ref} | La température de référence | [K] |
| R | La constante universelle des gaz parfaits | [8.314 J/K · mol] |
| I_{stack} | Le courant de fonction de la pile | [A] |
| $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4$ | Représentent les coefficients paramétriques pour chaque modèle de pile | |
| C_{O_2} | La concentration de l'oxygène dans l'interface du catalyseur de la cathode | |
| R_c | La résistance protonique de la membrane | |
| R_m | La résistance équivalente de la membrane pour le flux d'ions, | |
| ρ_M | La résistivité spécifique de la membrane pour le flux d'électron | |
| A | La surface active de la pile | [cm ²] |
| L | La largeur de la membrane | [cm] |
| I_{stack} | Le courant de fonction de la pile | |
| Ψ | Fraction de l'aire ouverte d'une plaque perforée | |
| q_{H_2} | Représente la débit molaire de l'hydrogène | [kmol/s] |
| V_{pac} | Tension réelle d'une pile unitaire | [V] |
| I_{pac} | Le courant de la pile à combustible | [A] |
| J | La densité de courant | [A/cm ²] |
| J_{max} | La densité de courant maximale | [A/cm ²] |
| V_{an} | Le volume de l'anode | [V] |
| n_{H_2} | Le nombre d'atome d'hydrogène dans le canal de l'anode | |
| P_{H_2} | Pression partielle d'hydrogène | [atm] |
| O_{H_2} | Pression partielle d'oxygène | [atm] |
| R | La constante universelle des gaz | [1.atm/Kmol.K] |
| P_u | La pression à l'intérieur du canal | [atm] |

Sommaire

| | |
|--|-------|
| Remerciements | 3 |
| Dédicace | 4-5 |
| Liste des Figures | 6-7 |
| Liste des tableaux | 8 |
| Listes des notation et symboles | 9-10 |
| Introduction Générale | 13-15 |
| Chapitre I : Etat de l'art du système de production électrique à Hydrogène vert | |
| I.1. Introduction | 17 |
| I.2.L'hydrogène | 17 |
| I.2.1. La production d'hydrogène | 19 |
| I.2.1.1. Production d'hydrogène à partir d'hydrocarbures | 20 |
| I.2.1.1.1. Production de l'hydrogène à partir la vaporeformage | 20 |
| I.2.1.1.2. Production de l'hydrogène à partir l'oxydation partielle | 20 |
| I.2.1.2. Production de l'hydrogène à partir la gazéification | 21 |
| I.2.1.3. Production de l'hydrogène à partir d'algues vertes et bactéries (biologique) | 21 |
| I.2.1.4. Production de l'hydrogène à partir l'énergie nucléaire | 21 |
| I.2.1.5. Technique de production de l'hydrogène solaire | 21 |
| I.2.2. Les principales formes de stockage de l'hydrogène | 22 |
| I.2.2.1. Stockage gazeux | 23 |
| I.2.2.2. Stockage liquide | 23 |
| I.2.2.3. Stockage solide | 24 |
| I.3. Sources d'énergies renouvelables | 24 |
| I.3.1 Production d'électricité par l'énergie solaire | 24 |
| I.3.2 Production d'électricité Via hydrogène | 25 |
| I.4.Système d'énergies hybride PV/H ₂ /PAC | 25 |
| I.5. Topologies des systèmes hybrides | 26 |
| I.5.1 Architecture à bus continu | 26 |
| I.5.2 Architecture à bus alternatif | 26 |
| I.6. Principaux composants des systèmes d'énergies hybrides | 26 |
| I.6.1 Modules solaires photovoltaïques | 26 |
| I.6.1.1 Cellule photovoltaïque | 26 |
| I.6.1.2 Générateur photovoltaïque | 27 |
| I.6.1.3 Type de modules photovoltaïques | 27 |
| I.6.1.4. Caractéristiques de references standards | 28 |
| I.6.1.5. Applications d'énergie solaire PV | 29 |
| I.6.2 Pile à combustible | 29 |
| I.6.2.1 Historique | 29 |
| I.6.2.2 .Principe de fonctionnement | 30 |
| I.6.2.3 .Caractéristiques électriques d'une pile à combustible | 31 |
| I.6.2.4. Différents types de piles à combustibles | 32 |
| I.6.2.5. Pile PEMFC | 33 |
| I.6.2.6. Matériaux du coeur de la pile | 34 |
| I.6.2.7. Avantages des piles PEMFC | 36 |
| I.6.2.8. Inconvénients des piles PEMFC | 36 |
| I.6.3. Electrolyse de l'eau | 37 |
| I.6.3.1. Performances de l'électrolyseur | 38 |
| I.6.3.2. Electrolyse alcaline | 40 |
| I.7. Avantages du système hybride | 41 |

| | |
|---|-----------|
| I.8. Conclusion | 41 |
| Chapitre II : Production et stockage de l'hydrogène vert | |
| II.1. Introduction | 43 |
| II.2. Modélisation du panneau photovoltaïque | 44 |
| II.2.1. Etude de la source photovoltaïque du système | 46 |
| II.2.2. Commande MPPT du PV | 46 |
| II.2.3. Résultats et interprétations | 47 |
| II.2.3.1. Influence de la température | 48 |
| II.2.3.2. Influence de l'éclairement | 49 |
| II.2.4. Caractéristique électrique du module photovoltaïque avec l'algorithme MPPT | 49 |
| II.2.5. Analyse des résultats | 50 |
| II.3. Modélisation de l'électrolyseur | 50 |
| II.3.1. Débit de production d'Hydrogène | 51 |
| II.3.2. Modèle thermique | 52 |
| II.3.3. Implémentation du modèle d'électrolyseur dans Matlab/Simulink | 53 |
| II.3.3.1. Caractéristiques d'électrolyseur | 54 |
| II.3.3.2. Influence de la Température | 55 |
| II.4. Modélisation de réservoir d'hydrogène | 55 |
| II.5. Modélisation des éléments de stockage d'énergie | 56 |
| II.6. Modélisation du hacheur boost (élevateur) | 57 |
| II.7. Conclusion | 57 |
| Chapitre III: La Pile à Combustible à Hydrogène, PEMFC : Etude, modélisation et contrôle | |
| III.1. Introduction | 59 |
| III.2. Modélisation de la pile PEMFC | 59 |
| III.2.1. Modèle de tension | 59 |
| III.2.2. Calcul des pressions partielles | 62 |
| III.2.2.1. Les hypothèses du modèle de calcul des pressions partielles | 62 |
| III.2.2.2. Calcul de la pression partielle d'hydrogène | 63 |
| III.3. Résultats de la simulation du pile à combustible | 65 |
| III.3.1. Caractéristique Tension/ Courant et Puissance | 65 |
| III.3.2. Résultats de simulation d'un pile à combustible par commande MPPT | 67 |
| III.4. Les Régulateurs Classiques | 68 |
| III.4.1. Régulateurs classiques de base | 69 |
| III.5. Contrôle de la PEMFC avec le régulateur PID | 74 |
| III.5.1. Résultats de la pile PEMFC avec PID : | 75 |
| III.6. Conclusion | 76 |
| Chapitre IV : Simulation du système et Résultats | |
| IV.1. Introduction | 78 |
| IV.2. Simulation du système hybride PV-H2-PAC | 78 |
| IV.3. Résultats et interprétations du PV | 78 |
| IV.3.1. Résultats et interprétations du PV avec MPPT | 79 |
| IV.4. Résultats et interprétations d'électrolyseur | 80 |
| IV.5. Résultats de la simulation du pile à combustible | 80 |
| IV.5.1. Résultats de la simulation du pile à combustible avec commande MPPT | 81 |
| IV.5.2. Résultats de la simulation du pile à combustible avec commande PI | 82 |
| IV.6. Conclusion | 83 |
| Conclusion générale | 84 |
| Références bibliographiques | 85- 87 |
| Résumé | 88 |

Introduction générale

L'hydrogène vert est devenu un sujet d'intérêt majeur dans le contexte du développement durable. En tant que carburant propre, il offre un potentiel immense pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et atténuer les effets du changement climatique. L'hydrogène vert est produit à partir de sources d'énergie renouvelables, telles que l'énergie solaire et éolienne, en utilisant des processus d'électrolyse de l'eau. Cette approche durable de production d'hydrogène présente de nombreux avantages et ouvre la voie à une multitude d'applications dans différents secteurs.

Dans les applications, l'hydrogène vert peut être utilisé de diverses manières où la plus courante est la production d'électricité à partir de piles à combustible à hydrogène. Ces piles convertissent l'hydrogène en électricité en ne produisant que de l'eau comme sous-produit, offrant ainsi une solution propre et efficace pour les véhicules électriques, les systèmes de stockage d'énergie et même les bâtiments.

L'hydrogène vert peut également être utilisé comme combustible direct dans des véhicules à hydrogène, offrant une alternative aux véhicules à combustion interne traditionnels et contribuant ainsi à la réduction des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur des transports. De plus, l'hydrogène vert peut être utilisé comme matière première dans des processus industriels tels que la production d'ammoniac, le raffinage pétrochimique et la fabrication de produits chimiques.

Dans le contexte du développement durable, la problématique majeure réside dans la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de lutter contre le changement climatique. Les énergies fossiles traditionnelles, telles que le charbon, le pétrole et le gaz naturel, sont responsables d'une grande partie de ces émissions. Leur combustion libère du dioxyde de carbone (CO₂) et d'autres gaz nocifs dans l'atmosphère, contribuant ainsi à l'effet de serre.

L'hydrogène peut être utilisé comme moyen de stockage d'énergie à grande échelle. Lorsque l'électricité produite à partir de sources renouvelables est en excès, elle peut être utilisée pour produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau. Cet hydrogène peut ensuite être stocké et converti à nouveau en électricité lorsque la demande est élevée à travers des piles à combustible., c'est le cas de notre projet de fin d'étude présenté dans ce volume de mémoire.

Les piles à combustible à hydrogène permettent de produire de l'électricité en combinant l'hydrogène avec de l'oxygène de l'air. Elles offrent une alternative propre aux combustibles fossiles dans de nombreux domaines, notamment les transports, la production d'électricité et les applications industrielles. La recherche scientifique vise à améliorer l'efficacité, la durabilité et la rentabilité des piles à combustible, ainsi qu'à développer de nouveaux matériaux et architectures pour les rendre plus performantes.

L'utilisation de l'hydrogène dans les véhicules à hydrogène présente de nombreux avantages, tels qu'une autonomie plus longue et un temps de recharge plus court par rapport aux véhicules électriques à batterie. La recherche scientifique se concentre sur le développement de technologies de stockage d'hydrogène sûres et efficaces pour les véhicules, ainsi que sur l'amélioration des performances des piles à combustible pour une mobilité durable.

L'hydrogène peut être utilisé pour décarboner certains secteurs difficiles à électrifier, tels que l'industrie lourde et la production d'acier. En utilisant de l'hydrogène vert au lieu de combustibles

fossiles, il est possible de réduire considérablement les émissions de carbone, c'est l'une des principales raisons dont nous avons essayé de l'entamer pour participer à résoudre cette problématique.

Le contexte de la pile à combustible, en particulier la Pile à Membrane Échangeuse de Protons (PEMFC), est un domaine de recherche important dans le développement des technologies de l'hydrogène. La PEMFC est l'une des technologies de piles à combustible les plus prometteuses en raison de ses avantages en termes de rendement énergétique élevé, de faibles émissions et de sa capacité à fournir une puissance instantanée.

La PEMFC utilise une membrane polymère électrolytique, généralement composée de proton-conducteurs, pour permettre la conduction des ions hydrogène (protons). L'hydrogène est alimenté du côté anode, où il est séparé en protons (H^+) et en électrons (e^-). Les protons traversent alors la membrane électrolytique vers la cathode, tandis que les électrons empruntent un circuit externe, créant ainsi un courant électrique utilisable.

Le principal avantage de la PEMFC réside dans sa capacité à fonctionner à des températures relativement basses (généralement entre 60 et 80 degrés Celsius), ce qui permet un démarrage rapide et une réponse rapide aux variations de charge. Cela en fait une technologie idéale pour les applications mobiles telles que les véhicules à hydrogène, où une puissance immédiate est essentielle.

Le développement et le contrôle de la pile à combustible PEMFC alimentée par l'hydrogène vert visent à atteindre plusieurs perspectives clés pour rendre cette technologie plus performante, rentable et largement applicable comme :

L'amélioration de l'efficacité énergétique, la réduction des coûts de fabrication des PEMFC, une durabilité accrue, l'optimisation de la gestion de l'eau tels que les systèmes d'hydratation et les échangeurs d'humidité. L'intégration de la pile à combustible PEMFC dans les systèmes énergétiques plus larges, tels que les véhicules électriques, les bâtiments et les réseaux électriques, nécessite des stratégies de contrôle avancées. Notre présent travail entre dans ce contexte à travers l'étude d'un système de production de l'énergie électrique propre à 0 carbone à base de l'hydrogène vert par le développement de techniques de contrôle optimales pour maximiser l'efficacité énergétique, la stabilité du système et la réponse aux variations de charge.

En atteignant ces perspectives, la pile à combustible PEMFC pourrait devenir une solution énergétique durable, offrant une efficacité énergétique élevée, des émissions réduites et une grande flexibilité d'application. Cela contribuerait à accélérer la transition vers une économie de l'hydrogène propre et à réduire notre dépendance aux combustibles fossiles.

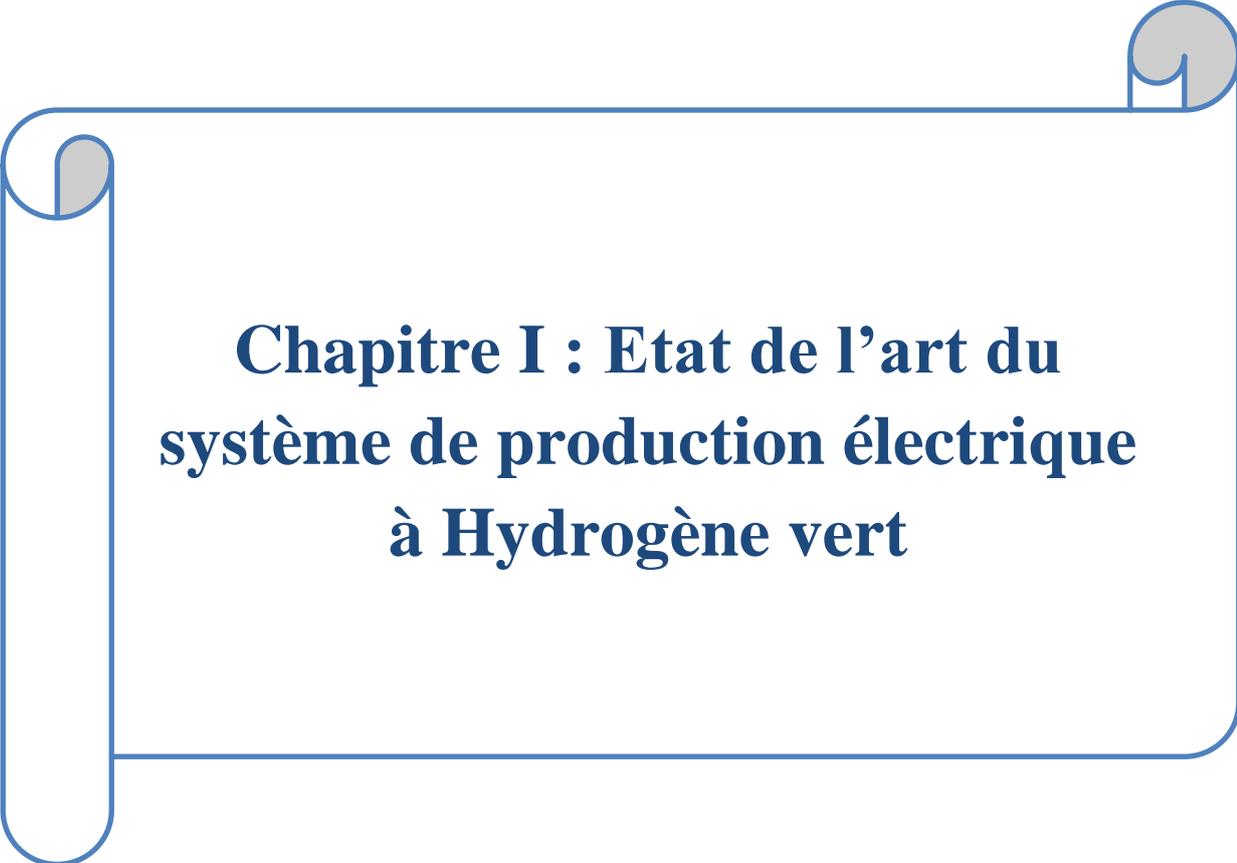
Le présent mémoire est formé de 04 chapitres cohérents et complémentaire où le premier présente un état de l'art sur les trois parties formant notre système étudié à savoir la source d'électricité en panneau solaire photovoltaïque qui va alimenter notre électrolyseur, la source de production de l'hydrogène par un électrolyseur et un réservoir de son stockage et finalement la source principale de production d'électricité décrit par une pile à combustible de type PEMFC.

Le deuxième chapitre présente l'étude d'un système photovoltaïque avec un MPPT contrôlé avec PO qui alimente une charge Electrolyseur pour produire de l'hydrogène

Le troisième chapitre est consacré à l'étude de la pile à combustible PEMFC à travers, la modélisation, le contrôle classique et intelligent pour un rendement meilleur de la puissance électrique produite

Le dernier chapitre présente la simulation et l'analyse des résultats du système à travers les différentes grandeurs électriques, thermiques et physiques qui entrent en jeu dans le fonctionnement du système et sa performance.

Une conclusion générale avec perspectives de recherche achève notre travail de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de master en électrotechnique industrielle.



**Chapitre I : Etat de l'art du
système de production électrique
à Hydrogène vert**

I.1 Introduction

Un système hybride de production électrique est défini comme une installation qui utilise deux ou plus des technologies de la génération d'énergie classique et une source de production d'énergie renouvelable. L'objectif d'utiliser des technologies multiples est de réunir les avantages et les meilleures caractéristiques optionnelles de chaque système. Le but d'un système hybride est d'assurer l'énergie demandée par la charge et de produire le maximum d'énergie à partir des sources d'énergie renouvelable. Les systèmes hybrides présentent de nombreux avantages : le rendement raisonnable, la faible pollution, la cogénération, néanmoins, elles présentent certains points faibles : le coût élevé de fabrication, la durée de vie, leur poids et leur volume.

Dans ce chapitre, nous allons parler de différentes techniques de stockage d'hydrogène et en suite, on va présenter d'une manière générale l'état de l'art des différents systèmes hybrides en mentionnant notre système étudié "photovoltaïque, électrolyseur d'eau, une pile à combustible" et le leur principe de fonctionnement.

I.2. L'hydrogène

L'hydrogène est l'élément le plus abondant de l'univers. Il est principalement utilisé raffinage du pétrole, traitement chimique, fabrication d'équipements électroniques, raffinage des métaux et transformation des aliments [1]. Comme on doit produire l'hydrogène, il ne s'agit pas d'une source d'énergie au même titre que le soleil, le vent, l'eau ou le charbon [1]. L'hydrogène est principalement composé de le reformage à la vapeur du méthane est généralement utilisé dans l'industrie pétrolière [1]. Ce processus utiliser des hydrocarbures et générer des émissions. Peut également produire hydrogène utilisant de l'électricité sans émission (comme l'énergie) l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne, l'énergie solaire ou l'énergie nucléaire (généralement par électrolyse) l'électricité divise l'eau en ses composants [1]. Montant de plus gros hydrogène est également produit en tant que sous-produit du processus industrie, comme la fabrication de chlore [1]. Que l'électrolyse ou le recyclage des déchets soient utilisés, la production d'hydrogène n'émet pas de dioxyde de carbone. Les particules ne sont pas non plus du soufre [1].

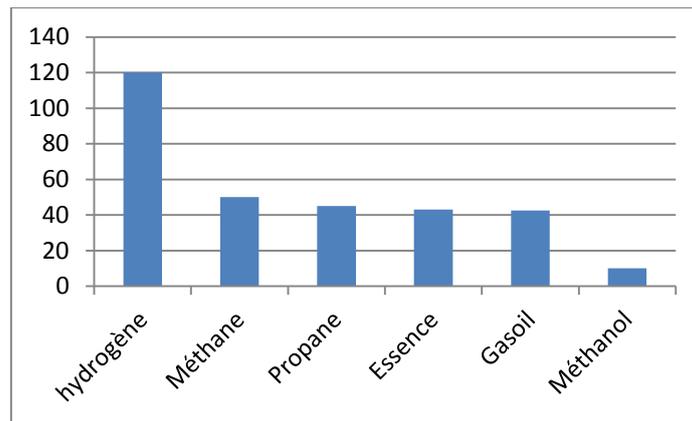
L'utilisation de l'hydrogène comme vecteur d'énergie présente plusieurs avantages [1]:

- L'hydrogène peut remplacer les combustibles fossiles.
- La production et l'utilisation d'hydrogène peuvent contribuer à améliorer l'hydrogène qualité de l'air et réduction des émissions de gaz à effet de serre.
- L'hydrogène permet de créer de nouveaux débouchés.
- Dans beaucoup de pays, permet d'améliorer la fiabilité énergétique et l'autonomie.
- Le stockage à long terme de grandes quantités d'énergie est possible.

Chapitre II : Production et stockage de l'Hydrogène vert

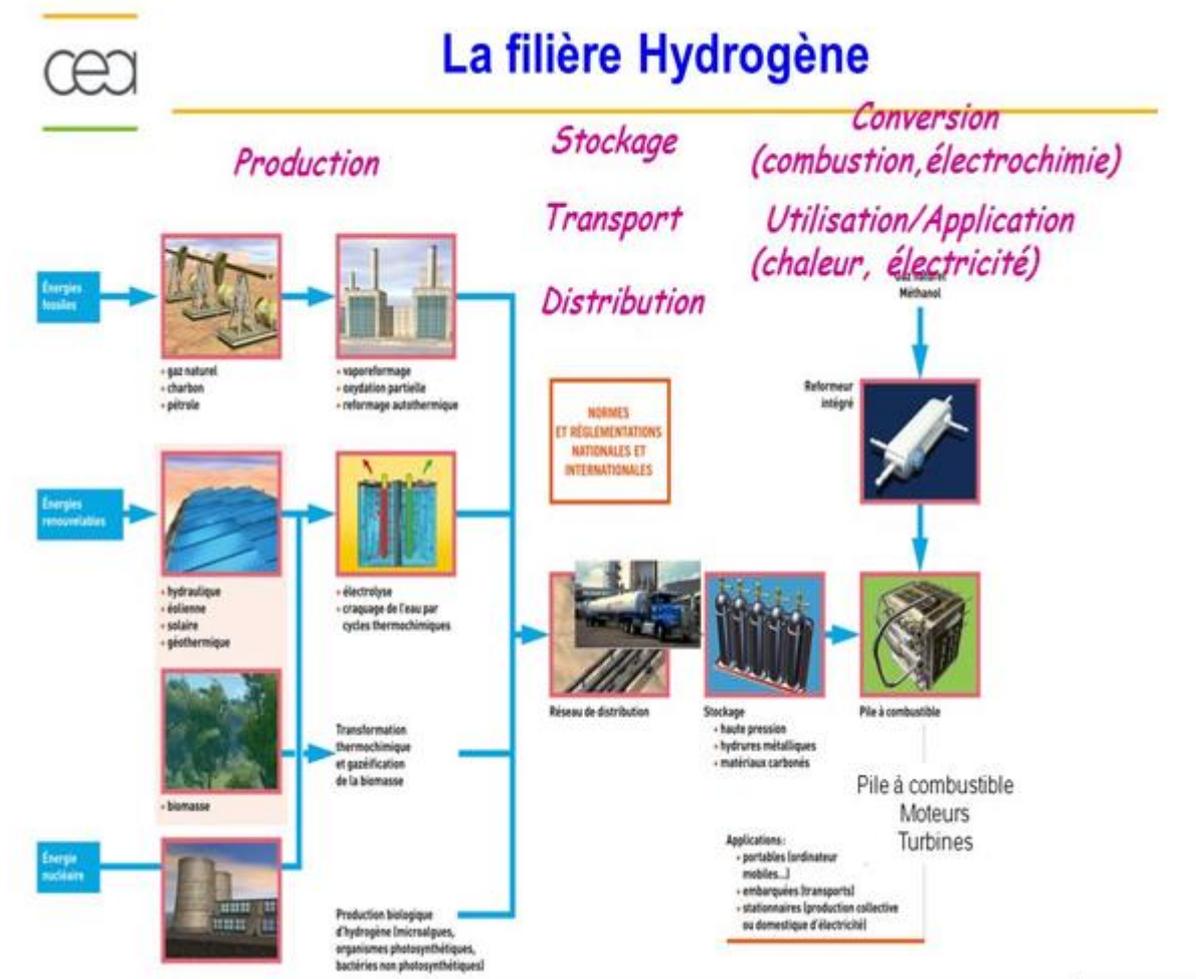
L'hydrogène peut être stocké sous forme de gaz comprimé ou de liquide, ou il peut être stocké sous forme d'hydrogène composé [1]. Ensuite, il est transporté sous forme de bouteilles de gaz, de remorques tubulaires ou de camions -citerne frigorifiques par canalisations ou routes [1].

Initialement identifié par **Cavendish** en 1776 et son nom proposé en 1787 entre autres par **Lavoisier** [2] et venant du Grec, signifie qui génère l'eau. Ainsi l'hydrogène réagit avec l'oxygène pour former de l'eau :



Figure(I.1).Densité d'énergie massique pour différents Vecteurs d'énergie.

L'énergie produite par la combustion de l'hydrogène est plus élevée que tout autre combustible figure (I.1). En comparant le pouvoir calorifique (LHV), le pouvoir calorifique de l'hydrogène Ils sont respectivement 2,4 fois, 2,8 fois et 4 fois supérieures à ceux du méthane, de l'essence et du charbon [3]. L'avantage de consommer de l'hydrogène de cette manière est qu'il ne dégage pas de CO₂. Mais en ce qui concerne sa production, 98% de la production peut maintenant être réalisée en reformant du pétrole ou du gaz naturel, puis une grande quantité de dioxyde de soufre est libérée. L'hydrogène peut en fait être inépuisable, tant que vous savez comment produire des quantités suffisantes d'hydrogène à un coût compétitif, en utilisant idéalement une énergie à faible émission de carbone (énergie nucléaire et renouvelable) pour produire de l'hydrogène. Nous parlons de «technologie de l'hydrogène» comme étant toutes les technologies recherchées pour produire de l'hydrogène, le stocker et le convertir en énergie, ou simplement toute la chaîne de l'hydrogène. Figure (I.2).

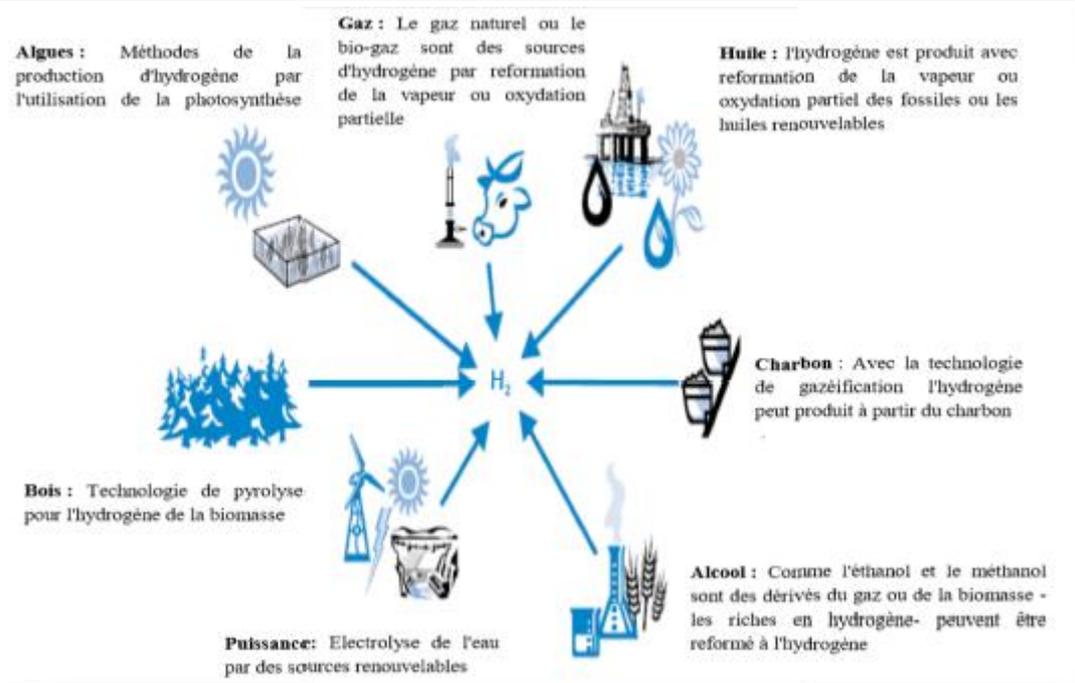


Figure(I.2). Synthèse de la filière hydrogène [4].

I.2.1. La production d'hydrogène

L'hydrogène est abondant à la surface de la terre, mais il n'existe pas à l'état pur. Il est toujours associé à d'autres éléments chimiques dans des molécules telles que l'eau et les hydrocarbures. Les organismes vivants (animaux ou végétaux) sont également composés d'hydrogène. Par conséquent, la biomasse est une autre source potentielle d'hydrogène. Comme montré. Figure(I.3), nous montre différentes manières de produire de l'hydrogène. Divisons ces méthodes en plusieurs catégories [5]:

Extraire l'hydrogène de ces ressources primaires que sont les hydrocarbures, la biomasse ou encore l'eau nécessite un apport en énergie.



Figure(I.3). Les différents modes de production de l'hydrogène [6].

I.2.1.1. Production d'hydrogène à partir d'hydrocarbures

I.2.1.1.1. Production de l'hydrogène à partir la vaporeformage

La production actuelle d'hydrogène repose essentiellement sur le vapocraquage du gaz naturel ou vaporeformage.

Aujourd'hui, c'est le cas de 95% de l'hydrogène produit. Le procédé le plus courant est le vaporeformage de Méthane:

On fait réagir le gaz naturel sur de la vapeur d'eau à une température de l'ordre de 900°C et à une pression de 20 à 30 bar, et à $\Delta H=206$ KJ/mol, en présence d'un catalyseur au nickel. Après la réaction :



On obtient un mélange de monoxyde de carbone et d'hydrogène. Le processus continue par la conversion du monoxyde de carbone en dioxyde de carbone CO_2 et hydrogène additionnel à une température de 200 à 400°C et à $\Delta H=-41$ KJ/mol, selon la réaction :



Au total, pour une molécule de CH_4 , on obtient par ce procédé quatre molécules d'hydrogène à $\Delta H=165$ KJ/mol, selon la réaction :



I.2.1.1.2. Production de l'hydrogène à partir l'oxydation partielle

L'oxydation partielle d'hydrocarbures est la deuxième méthode utilisée pour produire de l'hydrogène, via la production de gaz de synthèse (mélange de monoxyde de carbone et d'hydrogène). Cette méthode s'applique aux résidus pétroliers lourds ainsi qu'au charbon. Elle met en

oeuvre des températures très élevées (1200 à 1500°C), des pressions importantes (de 20 à 90 bar ou plus), de l'oxygène et de la vapeur d'eau.

Ces conditions techniques difficiles et coûteuses se justifient par le prix de la matière première peu élevé.

I.2.1.2. Production de l'hydrogène à partir la gazéification

Dans le procédé de gazéification, du charbon de bois est brûlé dans un réacteur. À très haute température (entre 1200 et 1500°C), les gaz libérés se reforment pour donner du H₂ et du monoxyde de carbone (CO).

I.2.1.3. Production de l'hydrogène à partir d'algues vertes et bactéries (biologique)

Les algues seraient une autre possibilité pour produire de l'hydrogène. En effet, au cours de la photosynthèse, les plantes vertes dissocient l'eau en hydrogène et oxygène. L'hydrogène est combiné au CO₂ pour construire des tissus végétaux tandis que l'oxygène est libéré dans l'atmosphère. On peut espérer que ce type de procédé pourra être techniquement au point d'ici 2 ans, et sur le marché d'ici 5 à 8 ans. [7]

I.2.1.4. Production de l'hydrogène à partir l'énergie nucléaire

Les réserves nucléaires de la Terre sont considérables. C'est pourquoi l'utilisation de l'énergie nucléaire qui a l'avantage de ne pas produire de CO₂ est donc envisagée pour produire de l'hydrogène. Les possibilités de production s'orientent vers la dissociation de la molécule d'eau qui est, elle aussi, très abondante. Cette dissociation peut se faire selon deux voies :

-L'électrolyse de l'eau par du courant électrique produit par une centrale nucléaire

-Des cycles thermochimiques endothermiques alimentés en chaleur par une centrale Nucléaire.

Les cycles thermochimiques présentent un rendement énergétique supérieur : de l'ordre de 50%, voire 60% en cas de cogénération d'électricité. Dans cette voie, l'énergie nucléaire est utilisée pour apporter la chaleur nécessaire à la réalisation des réactions. Il s'agit de cycles car la dissociation de l'eau est réalisée suite à plusieurs réactions dont les sous-produits sont réinvestis. [8]

I.2.1.5. Technique de production de l'hydrogène solaire

La production d'hydrogène à partir l'énergie solaire dépend d'électrolyse de l'eau. Ce qui se produit est le cassage des molécules d'eau en hydrogène et en oxygène, en utilisant le courant électrique produit par un panneau photovoltaïque. L'hydrogène propre peut utiliser comme un carburant, ou pour produire de l'énergie électrique ou puis stocker. [9]

Chapitre II : Production et stockage de l'Hydrogène vert

La production d'hydrogène par l'électrolyse connectée au panneau photovoltaïque s'avère la méthode la plus rentable et la plus protectrice de l'environnement.

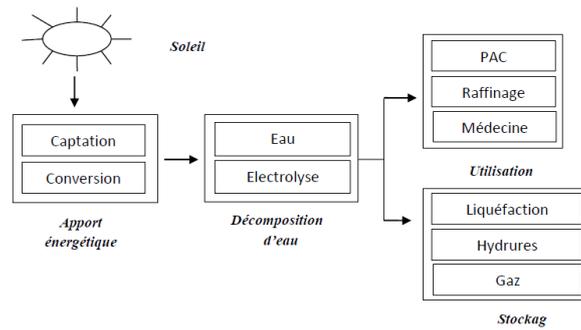
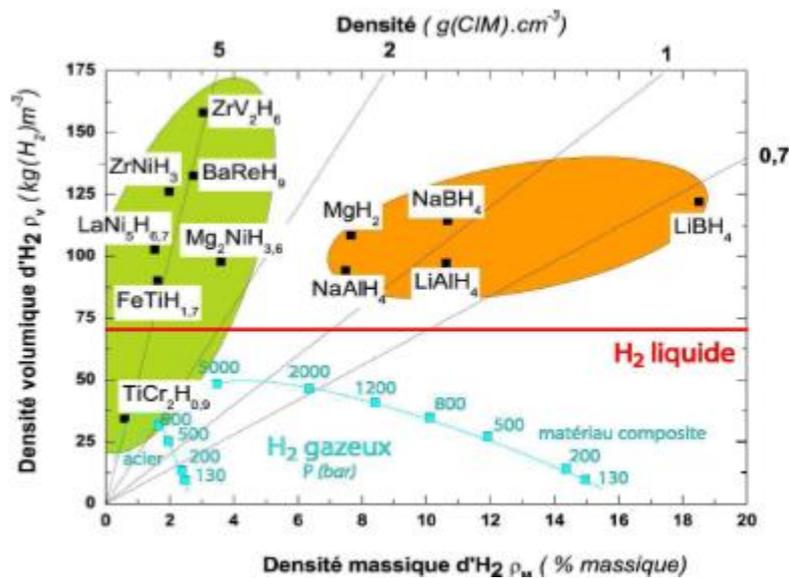


Figure.(I.4). Système synoptique de production de l'hydrogène solaire

I.2.2. Les principales formes de stockage de l'hydrogène [10]

Il existe trois grandes familles de stockage d'hydrogène: les voies solide, liquide et gazeuse. Züttel [11] a donné un figure(I.5), en fonction de sa capacité d'analyse de volume et de poids, propose des solutions techniques. Bleu Le transparent est utilisé pour le stockage de gaz et le rouge est utilisé pour le stockage de liquide (basse température). Le stockage à l'état solide utilise plusieurs couleurs pour distinguer les hydrures conventionnels verts des hydrures complexes orange. L'objectif est d'obtenir des méthodes de stockage mobiles ou fixes efficaces à court et long terme. En raison du grand nombre de restrictions à respecter, le problème est complexe: capacité de gravité, capacité volumique, coût, durée de vie, pression de refoulement maximale / minimale, temps de remplissage, température de fonctionnement, volume de fuite. . .



Figure(I.5). Capacités volumique et gravimétrique de candidat réel ou Potentiel au stockage de l'hydrogène [12], d'après Züttel [13].

I.2.2.1. Stockage gazeux

Le chemin du gaz est la technologie de stockage la plus simple et la plus largement utilisée. L'hydrogène est contenu dans un réservoir sous pression. Plus la pression est élevée, plus l'hydrogène est stocké. Le réservoir de stockage actuellement développé fonctionne à une pression maximale (environ 480 bars) de 300-350 bars (30-35 MPa). Les travaux actuels incluent la création de réservoirs de stockage de gaz en dessous de 700bar pour augmenter la capacité, ce qui est le principal inconvénient de cette technologie.

Pour leur conception, les réservoirs gazeux sont regroupés sous 4 types :

| Type | I | II | III | IV |
|-------------|---|----|-----|----|
| Schéma | | | | |
| Réalisation | | | | |

Tableau(I.1). Les différents types de réservoirs gazeux [14] [15].

Pour chaque type de réservoir de stockage, le choix de la coque extérieure (garniture) en contact avec l'hydrogène est critique. Dans le cas du type I, la contrainte mécanique est directement absorbée par la traversée. Par conséquent, il est préférable d'utiliser un matériau (acier) avec une limite d'élasticité plus élevée. En revanche, dans le cas des réservoirs de stockage de type III et de type IV, le revêtement sert de barrière à l'hydrogène. Ensuite, les matériaux à faible perméabilité à l'hydrogène sont préférés (pour le type III, l'aluminium est utilisé). La largeur, le motif, l'angle d'enroulement et le nombre de passes de fibre sont l'un des critères d'optimisation de l'enroulement filamentaire.

I.2.2.2. Stockage liquide

Afin de stocker l'hydrogène sous forme liquide, il est refroidi à 20 K (-253 ° C). Cette technologie est maîtrisée, notamment pour les applications spatiales ou le stockage fixe (hôpitaux, stations-service). Le volume est bien sûr important, mais la très basse température reste le principal problème de cette technologie. De plus, l'énergie de liquéfaction est élevée. Cette technologie est plus adaptée aux stockages fixes (station -service Air-Liquide, Linde cf) qui permettent d'obtenir une excellente isolation thermique. En revanche, dans les applications mobiles à isolation thermique limitée, le chauffage du réservoir de stockage provoquera l'évaporation de l'hydrogène, puis l'hydrogène doit être libéré pour limiter la pression interne dans le réservoir de stockage. De

cette manière, l'utilisation de véhicules hybrides (essence / hydrogène) peut charger longtemps de l'hydrogène.

I.2.2.3. Stockage solide

Le stockage solide est exploité dans des conditions de température et de pression standard. Il existe de nombreuses formes de stockage à semi-conducteurs. Étiquette de tableau. (I.2). Quatre plats principaux sont proposés.

| | |
|--|---|
| Stockage par adsorption -charbon actif -nanotubes -nano fibre de graphite -MOFs , Zéolites, .. | Hydrures chimiques (réactif avec l'eau) -NaH encapsulé -LiH et MgH ₂ CaH ₂ , LiAlH ₄ ,... |
| Hydrures réversibles -Alliages et composés intermétalliques - Nanocristaux - Hydrures complexes | Hydrures chimiques (thermique) -Borozane d'ammoniac - Hydrure d'aluminium |

Tableau(I.2). Les différents groupes de stockage solide [16].

I.3. Sources d'énergies renouvelables

Il s'agit de sources qui se renouvellent et ne s'épuiseront donc jamais à l'échelle du temps humain ! Les sources non renouvelables sont les énergies fossiles comme le pétrole, le charbon et le gaz dont les gisements limités peuvent être épuisés. Les sources renouvelables sont l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, et la géothermique [17]. Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes concentrés sur la production d'électricité à partir de l'énergie solaire, énergie électrochimique via la pile à combustible et l'électrolyseur d'eau [18]. Nous détaillons dans les paragraphes suivants les éléments ayant traités à cette ressource et sa transformation en énergie électrique.

I.3.1 Production d'électricité par l'énergie solaire

Le soleil est notre source d'énergie la plus puissante, elle fournit à notre belle planète chaleur et lumière et en quantité. L'exploitation de l'énergie solaire ne dégage presque aucune pollution, son impact environnemental en utilisation est donc très faible. Et nous l'exploitons de différentes façons, avec les panneaux solaires, qu'ils soient thermiques ou photovoltaïques. Mais aussi via les

éoliennes car c'est le soleil qui permet le déplacement de masse d'air et donc de faire tourner les pales [19].

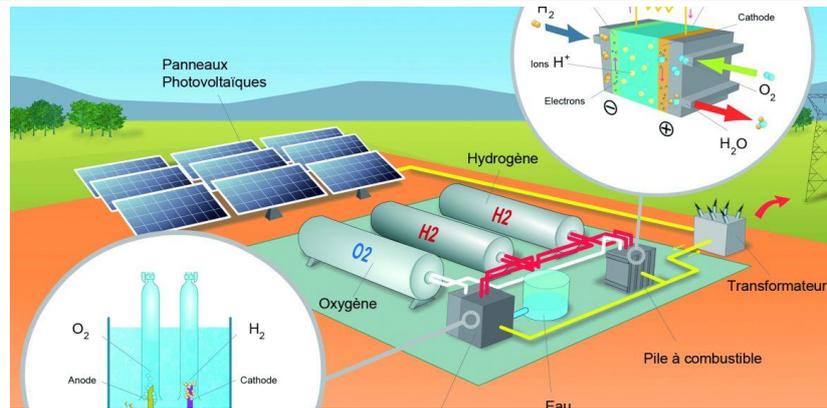
I.3.2 Production d'électricité Via hydrogène

L'hydrogène est considéré comme un remplacement aux énergies fossiles d'aujourd'hui car il est abondant, efficace et contrairement à d'autres alternatives, il offre le potentiel d'être renouvelable et il ne produit pas d'émissions. Il peut être utilisé comme porteur d'énergie pour générer du courant électrique avec les piles à combustible hydrogène et les moteurs à combustion d'hydrogène. Dans une pile à combustible, l'hydrogène se combine à l'oxygène de l'air pour créer de l'électricité. La pile à combustible peut fonctionner en continu et générer de l'énergie tant que le combustible hydrogène est fourni et les seuls produits dérivés sont la chaleur et l'eau. De nombreuses piles à combustible utilisées aujourd'hui pour la génération d'énergie distribuée demandent l'intégration avec un processeur de combustible pour produire un gaz riche en hydrogène à partir d'un combustible à base d'hydrocarbures tel que le gaz naturel ou le propane. Cependant, l'utilisation directe d'hydrogène haute pureté dans la pile à combustible présente de nombreux avantages. Les applications qui se prêtent à l'alimentation directe en combustible hydrogène sont les appareils portables, l'alimentation électrique principale, l'alimentation électrique de secours, l'écrêtement des pointes et la stabilisation du réseau. [20]

I.4.Système d'énergies hybride PV/H₂/PAC

Le système hybride de production de l'énergie dans sa vue la plus générale, est celui qui combine et exploite plusieurs sources disponibles facilement mobilisables. Il consiste en l'association de deux ou plusieurs technologies complémentaires de manière à accroître la fourniture d'énergie par une meilleure disponibilité. Les sources d'énergie comme le soleil et le vent ne délivrent pas une puissance constante, et leur combinaison peut permettre de parvenir à une production électrique plus continue. Les journées ensoleillées sont en général caractérisées par une activité éolienne faible alors que les vents forts sont observés plutôt lors de journées nuageuses ou la nuit. Le but d'un système hybride est d'assurer l'énergie demandée par la charge et, si possible, de produire le maximum d'énergie à partir des sources d'énergie renouvelable, tout en maintenant la qualité de l'énergie fournie [21]. De plus, la baisse de prix obtenus par la génération hybride doit au moins couvrir l'investissement fait pour les générateurs d'énergie renouvelable et les autres composants auxiliaires du système.

Dans le système hybride étudié (Figure I.6) formé par une source photovoltaïque, un électrolyseur de production d'hydrogène et une pile à combustible de type PEMFC alimentée par le gaz H₂ stocké dans un réservoir.



Figure(I.6) : Description du système PV-PAC

Ce système 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. Bien que le système de stockage par l'hydrogène aie un rendement plus faible que celui des batteries, le rendement du système hybride est augmenté par l'utilisation totale de l'énergie délivrée par le champ photovoltaïque, permise par le stockage saisonnier de l'énergie. Notre étude se concentre principalement sur le système de stockage par l'hydrogène et sur son intégration dans un système autonome de génération d'énergie.

I.5. Topologies des systèmes hybrides

La conception d'un système hybride repose essentiellement sur le type de bus (réseau d'interconnexion des différents composants du système), divisés généralement en trois catégories [22][23] :

I.5.1 Architecture à bus continu

Un système hybride couplé au bus continu est un système dans lequel les différentes sources sont raccordées avec la charge de consommation à l'aide des capacités [24].

I.5.2 Architecture à bus alternatif

Un système hybride couplé au bus AC, est un système dans lequel les différents générateurs d'alimentation sont directement reliés à un réseau de courant alternatif ou à des charges de consommation à courant alternatif. [24].

I.6. Principaux composants des systèmes d'énergies hybrides

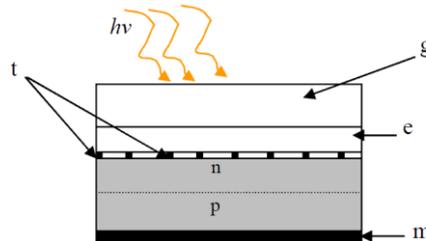
I.6.1 Modules solaires photovoltaïques

I.6.1.1 Cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque », a été découverte par E. Becquerel en 1839. Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants. La structure la plus simple d'une

cellule photovoltaïque comporte une jonction entre deux zones dopées différemment du même matériau ou entre deux matériaux différents (hétérojonction). Le but de la structure photovoltaïque, c'est de créer un champ électrique interne [25][26].

Dans la figure (I.7) un échantillon schématisé d'une configuration de la cellule solaire, Elle se compose d'un abri du verre (g), un encapsulant (e), et un métal en arrière contact (m) afin de réduire les pertes par réflexion du rayonnement incident.



Figure(I.7): Présentation schématisée d'une cellule solaire.

Dans une cellule PV, une large fraction de ces électrons et trous atteignent la jonction p-n, et un champ électrique est créé. En conséquence, un courant électrique peut être établi en connectant les matériaux de type-n et type-p à un circuit extérieur. La direction de ce courant est l'opposé de celle de la cellule lorsqu'elle fonctionne en tant que diode, autrement dit, quand la diode est illuminée, un courant positif I traverse de n vers p [25].

I.6.1.2. Générateur photovoltaïque

La cellule solaire, de forme ronde ou carrée est l'élément de base d'un système solaire. Un ensemble de cellules forme un module solaire, dans un module les cellules sont reliées électriquement entre elles et encapsulées, donc protégées des agents extérieurs. Plusieurs modules forment un panneau solaire. Plusieurs panneaux forment un système ou champ solaire, auxquels viennent s'ajouter des protections, un régulateur, un système de stockage de l'énergie (batterie) des appareils de contrôle et de mesure, un onduleur. 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 [27][28]

I.6.1.3 .Type de modules photovoltaïques

Il existe différents types de cellules photovoltaïques. Il est donc indispensable de connaître les particularités de chacune :

a- Cellules monocristallines

Les cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. Les cellules sont rondes ou presque carrées et, vues de près, elles ont une couleur uniforme. Elles ont un taux de rendement de

12 à 16%, mais la méthode de production est laborieuse et difficile, et donc très cher, car il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur.

b- Cellules polycristallines

Les cellules polycristallines sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vues de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux (tonalités différentes). Elles ont un rendement de 11 à 13%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines.

c- Cellules amorphes

Les cellules amorphes ont un coût de production bien plus bas, mais malheureusement leur rendement n'est que 6 à 10%. Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium. On peut donc appliquer de très fines couches de silicium amorphe sur des vitres, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide.

C'est le silicium amorphe qu'on trouve le plus souvent dans les petits produits de consommation comme les calculatrices et les montres, mais aussi plus récemment sur les grandes surfaces utilisées pour la couverture des toits. La figure (I.8) suivante nous résume les différents types de cellules photovoltaïques



Les cellules monocristallines

Les cellules polycristallines

Les cellules amorphes

Figure(I.8): Types de cellules photovoltaïques

Les cellules monocristallines et polycristallines sont les plus répandues mais leur fragilité oblige à les protéger par des plaques de verre, ce qui accroît d'autant plus le poids du panneau solaire.

I.6.1.4. Caractéristiques de références standards

Sur la fiche technique d'un module photovoltaïque figurent bien entendu ses caractéristiques physiques : dimensions, poids, principe de fixation, connexions de sortie, et surtout ses caractéristiques électriques. Les modules photovoltaïques sont mesurés et garantis dans des conditions de référence dites « STC » (Standard Test Conditions) qui sont:

- Rayonnement solaire 1000 W/m² ;

- Spectre solaire AM 1.5 ;
- Température ambiante 25 °C.

Ces conditions sont normalement rappelées sur les fiches techniques des modules

I.6.1.5. Applications d'énergie solaire PV

Les applications pour un usage domestique sont nombreuses : un système de dessalement, pompage de l'eau, éclairage public, lampe solaire de jardin (abri, piscine, garage, cabanon), d'intérieur, de poche, murale, ou encore avec détecteurs de mouvements. Les installations domestiques de panneaux photovoltaïques permettent de devenir un véritable producteur d'électricité à domicile. Une connexion s'établit entre une installation et le réseau électrique local permettant de l'approvisionner en électricité [29].

L'électrification de zones isolées : dans les zones rurales ou certaines régions de pays en voie de développement n'étant pas raccordées au réseau électrique, l'installation est connectée à une batterie stockant l'énergie produite durant la journée pour la redistribuer à n'importe quel moment. Dans les objets de la vie quotidienne les cellules photovoltaïques peuvent être utilisées dans de nombreux appareils électriques de la vie quotidienne, comme les montres, les calculatrices.

I.6.2. Pile à combustible

I.6.2.1 Historique

Considérée comme une solution idéale pour satisfaire les besoins en énergie électrique tout en limitant la pollution, la pile à combustible est en effet un bon convertisseur d'énergie. C'est ainsi que depuis le XIX^{ème} siècle, l'homme a cherché à développer ce type de pile. Mais les études n'ont réellement été approfondies qu'au XX^{ème} siècle puisque la pile à combustible semble respecter le concept du développement durable, un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre à leurs propres besoins. L'histoire du développement de la pile à combustible couvre plus de 170 ans [30].

1839 : Le chimiste allemand Christian Schönbein découvre l'effet pile à combustible.

1842 : Le chimiste amateur anglais William R. Grove réalise le premier modèle de laboratoire de pile à combustible (utilisation de l'électrolyse inverse de l'eau pour produire du courant à partir d'O₂ et de H₂ et réalisation de la réaction avec triple contact entre électrolyte, réactifs et catalyseurs).

1932 : L'anglais Francis Thomas Bacon reprend les études au sujet de la pile à combustible.

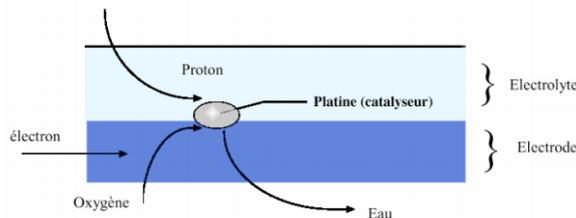
1953 : Francis T. Bacon réalise un premier prototype de 1kW, puis 5 kW.

1959 : Francis T. Bacon réalise un deuxième prototype de 5 kW, ce prototype servira de modèle pour les futures piles à combustible utilisées lors des missions spatiales Apollo.

Années 90 : Début du développement de la pile à combustible dans le domaine du transport.

I.6.2.2 .Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'une pile à combustible est chimique : l'électricité est produite grâce à une réaction d'oxydoréduction. Ici, l'énergie chimique d'un combustible (en général de l'hydrogène) est directement transformée en énergie électrique, sans passer par l'énergie thermique. Ce qui constitue le gros avantage de la pile à combustible par rapport à d'autres modes de production d'électricité. Le principe est le suivant : la pile est constituée de 2 électrodes, l'anode et la cathode, séparées par un électrolyte, un matériau qui ne laisse pas passer les électrons, juste les ions [30]. On alimente tout d'abord la pile en hydrogène (le combustible) et en oxygène. L'anode est chargée en hydrogène provenant d'un réservoir et la cathode est chargée en oxygène provenant de l'air. Dans l'anode, suite à la réaction d'oxydation, la molécule H₂ de dihydrogène est dissociée en ions H⁺ et en électrons. Ces derniers sont captés par l'anode et, ne pouvant traverser l'électrolyte, sont contraints de circuler dans un circuit externe, ce qui crée un courant électrique continu. En parallèle, les ions H⁺ traversent l'électrolyte et arrivent sur la cathode, où a lieu la réaction de réduction de l'oxygène : les ions H⁺ se combinent à la molécule O₂ et aux électrons pour former de l'eau, qui est évacuée sous forme de vapeur [19]. La réaction produit également de la chaleur. Pour que la réaction ait lieu, on utilise un catalyseur, le plus souvent de platine. Ce dernier a pour rôle d'augmenter la vitesse de réaction sans pour autant être consommé lui-même. Le catalyseur est disposé sur l'anode et sur la cathode, au niveau d'un point de contact entre l'électrolyte et l'électrode, de manière à ce que tous les « acteurs » de la réaction d'oxydation ou de réduction soient présents, comme indiqué sur la figure (I.9) [18].



Figure(I.9) : Principe de fonctionnement d'une pile à combustible [31]

Au final, le fonctionnement d'une pile à combustible peut être représenté de la manière suivante :

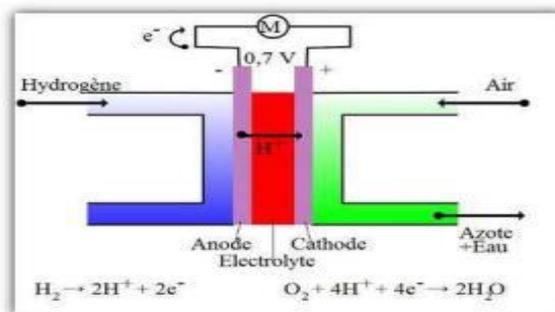
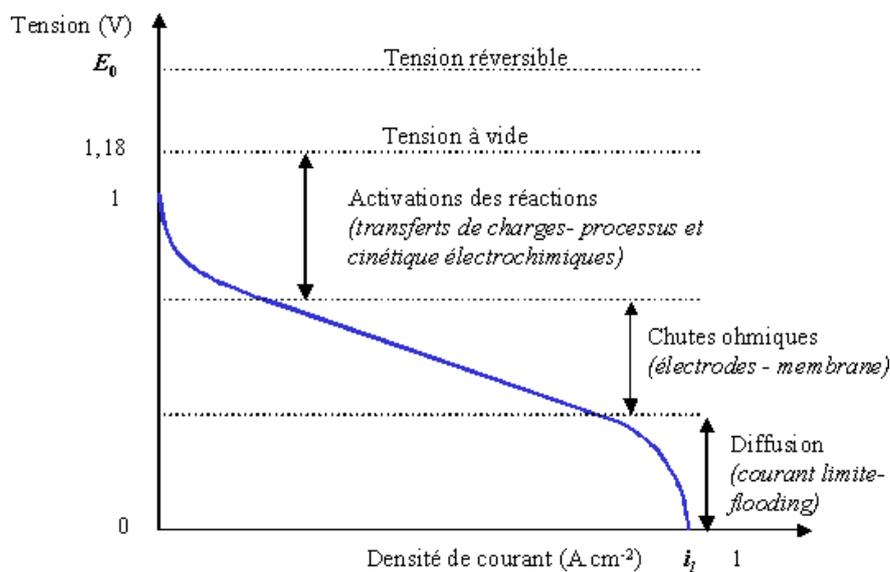


Figure (I.10): Fonctionnement d'une pile à combustible [31]

Par ailleurs, la tension produite par le courant électrique créé n'est que de 0.7 V maximum par cellule, il faut donc brancher plusieurs cellules en série pour obtenir une tension importante. Enfin, le courant électrique créé par la pile est continu. Par conséquent, pour certaines applications (courant domestique par exemple), il devra être transformé en courant alternatif au moyen d'un alternateur.

I.6.2.3 .Caractéristiques électriques d'une pile à combustible

La caractéristique électrique d'une pile à combustible est déterminée par le nombre de cellules en série, définissant la tension totale et par la taille de la surface active, déterminant le courant délivré. Les caractéristiques électriques d'une cellule de pile à combustible basse température sont décrites à la Figure I-11. La tension à vide est d'environ 1 V. Lorsque la densité de courant augmente, les pertes sont plus importantes : la tension diminue. Pour de fortes densités de courant, la tension chute rapidement : la réaction est limitée par des problèmes de diffusion des ions vers les sites de réaction. On limite généralement la tension à 0,4-0,5 V, tension du point de puissance maximale[32].. L'influence des différents paramètres est décrite plus loin



Figure(I.11): Caractéristique électrique d'une cellule de pile à combustible

Trois régimes de fonctionnement de la pile à combustible apparaissent sur la figure ci-dessus.

1. Zone 1 : pour les faibles densités de courant le transfert de charge à la cathode est prédominant ; le potentiel est fonction de $\ln(j)$, les autres termes de l'équation caractéristique sont négligeables.

2. Zone 2 : pour les densités de courant moyennes, la courbe caractéristique suit un régime linéaire, la chute ohmique (principalement due à la résistance de l'électrolyte R_e) est prépondérante.

3. Zone 3 : à densité de courant élevée, la tension de cellule est gouvernée par le transport de matière par diffusion. Lorsque j s'approche de l'une des deux densités de courant limites j_{la} ou j_{lc} , l'épuisement de matière active au voisinage des électrodes conduit à l'effondrement de la tension de cellule. Le fonctionnement de la pile dans cette zone peut engendrer des dégradations au niveau des matériaux d'électrode.

Pour éviter toute détérioration de la pile à combustible, on limite habituellement le fonctionnement de la pile à une tension seuil. La densité de courant débitée correspondante dépend alors de la composition des électrodes.

I.6.2.4. Différents types de piles à combustibles

On classe habituellement les piles à combustibles selon leur électrolyte et leur température de fonctionnement. Ainsi on distingue au total 6 types différents de piles à combustible divisés en deux catégories : les PAC à basses températures et les PAC à hautes températures.

Il faut savoir qu'actuellement il y a deux types de pile intensivement étudiés afin de les développer et les améliorer : les piles de types PEMFC et SOFC.

***La SOFC** (SolideOxide Fuel Cell) : sa température de fonctionnement est de l'ordre de 700°C à 1000°C et elle utilise comme électrolyte une Zircone Ytrée avec un rendement électrique supérieur à 60% lorsqu'elle est combinée à une turbine à combustion. Elle oxyde le CO et peut être directement alimentée en méthane. Elle est destinée dans les dix prochaines années au secteur industriel car elle permet d'obtenir des puissances de plusieurs centaines de kW. Elle pourrait être utilisée dans les transports pour la propulsion de véhicules lourds (trains, bateaux) ou à bord de véhicules plus légers (sous forme d'APU : Auxiliary Power Unit).

***La PAFC** (PhosphoricAcid Fuel Cell) : pour une température de fonctionnement proche de 200°C et une température de sortie avoisinant les 120°C, avec un rendement total de 80% (40% électrique, 40% thermique), cette pile est aussi destinée au chauffage et à la production d'eau chaude sanitaire. Notons que c'est la première pile à combustible à avoir été mise sur la marche. L'inconvénient de ces piles réside dans le fait qu'elles ne savent pas oxyder autre chose que l'hydrogène et qu'elles sont très sensibles au monoxyde de carbone (CO).

***La MCFC** (Molten Carbonate Fuel Cell) utilise comme électrolyte un mélange de carbonates et est capable d'oxyder le monoxyde de carbone. La température de fonctionnement est d'environ 650°C. Cette technologie de pile est encore au stade de développement à cause de son coût élevé.

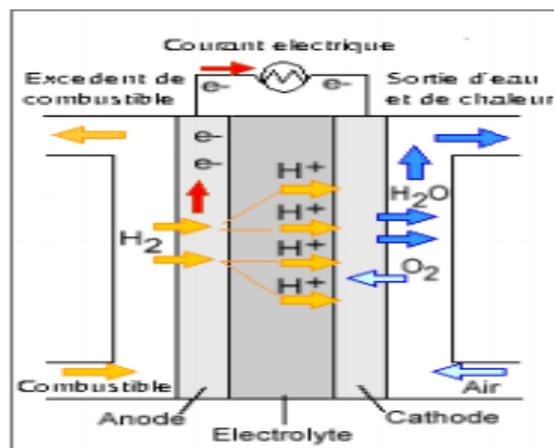
***La AFC** (Alkaline Fuel Cell) basée sur le principe de Bacon, elle est l'une des plus développées des piles à combustible au stade de développement et commercialisation. Sa température de fonctionnement est comprise entre 60°C et 90°C. Son principal handicap est sa sensibilité au dioxyde de carbone (CO₂).

*La DMFC (Direct Methanol Fuel Cell) est proche du fonctionnement de la pile PEFC. La température de fonctionnement est d'environ 70°C. L'anode est alimentée directement par un mélange de méthanol et d'eau et l'électrolyte est une membrane polymère (ou électrolyte liquide) qui transporte les protons H⁺.

Dans les travaux de cette mémoire on s'intéresse particulièrement à la pile PEMFC[31].

I.6.2.5. La Pile PEMFC

Les piles à combustible à membrane échangeuse de protons (Polymer Exchange Membran Fuel Cell) font l'objet de recherches intensives depuis les années 90 afin de réduire leur coût. En effet, leur potentiel n'est pas négligeable car elles sont polyvalentes ! On peut aussi bien les utiliser pour les transports, que pour le stationnaire et même pour les technologies portables [33].



Figure(I.12): Pile Type PEMFC

Dans ce type de piles l'électrolyte est une membrane polymère conductrice de protons. On remarque également la présence de plaques de diffusions, et de plaques bipolaires. L'électrolyte a pour rôle de conduire les protons H⁺ pour assurer le passage des charges électriques dans la pile. La membrane est étanche au dihydrogène et au dioxygène et empêche le passage des électrons à l'intérieur de la pile. Son épaisseur peut être de l'ordre de la dizaine de microns ce qui favorise le passage des protons. Ces protons ont besoin d'eau pour circuler. Ainsi la membrane doit être précisément humidifiée pour ne pas altérer le fonctionnement de la pile. En effet, une membrane sèche ne sera pas un bon conducteur et s'usera, à l'inverse une membrane trop humide risque de noyer les électrodes. Actuellement, les piles de type PEMFC ont une membrane en Nafion produit par Dupont de Nemours. Les électrolytes des PEMFC fonctionnent pour des températures comprises entre 60 et 90°C, à des pressions comprises entre 1 et 5 bars. Les électrodes ont une géométrie complexe. En effet, elles doivent mettre en contact les réactifs, l'électrolyte et un conducteur électronique. Elles sont toutes les deux recouvertes de Platine. Ce catalyseur a pour but de favoriser la réaction d'oxydation du H₂ pur ou reformé, qui est le combustible de la pile, et de

réduction de l'oxygène contenu dans l'air. L'air est, dans ce cas, l'oxydant. Les réactions aux électrodes sont donc :



Les électrodes que l'on trouve aujourd'hui sont composées de particules de Carbone ayant un diamètre compris entre 20 et 50 nm. On vient ensuite déposer sur celles-ci des particules de Platine dont le diamètre varie entre 2 et 4 nm. La teneur en Platine est en général de l'ordre de 0.2 mg/cm². Le fonctionnement des PEMFC peut être altéré à cause du catalyseur. En effet, celui-ci absorbe le monoxyde de carbone qui n'a pas été éliminé pendant le procédé de purification. Les PEMFC sont également composées de plaques de diffusion. Elles entourent les électrodes et servent à : [30]

- Permettre la diffusion des gaz jusqu'aux électrodes.
- Permettre le transfert des électrons.
- Assurer la gestion de l'eau en l'évacuant ou en humidifiant la membrane.

Ces plaques sont constituées d'un substrat de fibre de carbone que l'on recouvre de graphite et d'un polymère hydrophobe : le PTFE. Ainsi, les plaques de diffusion sont poreuses et conductrices. Enfin, les plaques bipolaires servent à :

- Collecter le courant.
- Séparer les gaz à l'anode et à la cathode.

Elles sont généralement composées de feuilles de graphite, de composite ou de métaux à base de carbone. En effet, cela permet aux plaques bipolaires d'être de bons conducteurs électriques et d'être imperméables aux gaz [30].

I.6.2.5.1. Matériaux dans la pile combustible

A. L'Electrolyte

La PEMFC fonctionne à basse température c'est-à-dire à une température inférieure, à 100 ° C. En effet, le matériau électrolytique est une membrane échangeuse de protons. En d'autres termes, une membrane organique. Son rôle essentiel est de manière sélective le passage des protons de l'anode, où ils sont produits, à la cathode, où ces protons s'associent à des ions d'oxydes pour former de l'eau.

Si la batterie fonctionnait à haute température, la membrane serait endommagée de manière irréversible. De plus, les membranes doivent être hydratées pour remplir leur rôle d'électrolyte. Des températures supérieures à 100 ° C sont donc problématiques dans l'eau de se présenter alors sous forme de vapeur. Si, dans les années à venir, il est possible de développer des produits qui ont

résisté à des températures élevées, tout en préservant leur caractère d'échange de protons, il a suffi ceux-ci. de la pile pour conserver l'eau sous sa forme liquide.

La membrane aujourd'hui utilisée est généralement le Nafion TM , un polymère carboné per fluoré (tous les atomes d'hydrogène sont remplacés par des atomes de fluor) contenant des groupements sulfonés, et d'une épaisseur de quelques centaines de micromètres au plus. Cette membrane est la propriété d'une société, Dupont de Nemours et en possède donc l'exclusivité [34].

B.. Electrodes

Les électrodes sont aujourd'hui à base de platine. Ce métal répond à plusieurs impératifs :

*Compte tenue la température relativement faible à laquelle fonctionne la PEMFC , les électrodes doivent catalyser les réactions d'oxydation du combustible et de réduction du comburant. Le platine est généralement un excellent catalyseur.

*Les électrodes doivent être stables dans le temps. Or la membrane aujourd'hui utilisée est fortement acide, celui qui proscrit d'emblée des matériaux qui seraient certes de bons catalyseurs, mais qui subiraient la corrosion du fait de l'environnement acide du coeur de pile.

A ce jour, le platine apparaît donc comme l'une des seules solutions possibles à ce problème. Le principal inconvénient de cette solution est que le platine est un métal rare et noble, donc coûteux. De nombreuses recherches sont faites dans le monde pour tenter de remplacer le platine par d'autres matériaux et pour tenter de diminuer les quantités contenues dans les électrodes. Pour se donner une idée de la quantité de platine embarquée dans une pile, il faut savoir qu'il faut compter entre 0,1 mg et 1 mg de platine par centimètre carré d'électrode. Une pile complète embarquera donc plusieurs grammes de ce précieux métal.

Le platine est employé sous forme de particules nanométriques dispersées dans un support poreux et conducteur, généralement de la poudre de carbone [34].

C. Assemblage

Une cellule élémentaire est l'assemblage des trois éléments essentiels : une anode, un électrolyte et une cathode. Dans le cas de la PEMFC, cet assemblage est solide et a une épaisseur de quelques centaines de micromètres. A ces trois éléments de base, il faut ajouter les couches de diffusion, qui permettent aux gaz (combustible) de se diffuser à la surface des électrodes, et les plaques bipolaires dont le rôle est multiple : elles permettent de distribuer les gaz, de collecter le courant électrique généré aux électrodes et éventuellement de réguler la température du coeur en faisant circuler un fluide caloporteur (généralement de l'eau) dans leur épaisseur.



Figure (I.13): Photographie d'un assemblage

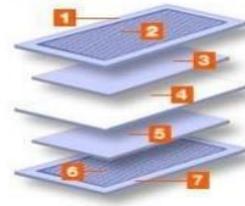


Figure (I.14): Vue éclatée d'une cellule de PEM

1. Joint d'étanchéité
2. Couche de diffusion de gaz + collecteur de courant
3. Catalyseurs anodiques
4. Membrane
5. Catalyseurs cathodiques
6. Couche de diffusion de gaz + collecteur de courant
7. Joint d'étanchéité

I.6.2.5.2. Avantages des piles PEMFC

Dans les piles PEMFC la couche électrolytique centrale est un polymère conducteur de protons. Sur les deux faces de la membrane l'anode (d'un côté) et la cathode (de l'autre côté) sont des couches électrolytiques à base de platine fixées sur des particules de carbone. Cette version possède trois avantages de base : Celui de fonctionner à relativement basse température : 60 à 90 °C, ce qui limite évidemment (mais sans plus pour ce qui nous concerne) ses domaines d'emploi, celui d'une mise en régime très rapide, d'une assez grande simplicité, celui d'une absence d'émissions polluantes (si on utilise de l'hydrogène comme combustible).

I.6.2.5.3. Inconvénients des piles PEMFC

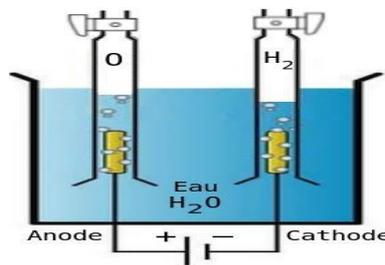
Pour le moment les coûts d'investissement et de maintenance restent encore assez élevés : s'ils ne deviennent pas rapidement acceptables les piles à combustible resteront des curiosités. Hors de cet aspect général l'inconvénient principal est que la pile doit fonctionner à partir d'un combustible qui ne peut guère être que de l'hydrogène pur, lequel peut être produit à partir de charbon, de gaz naturel ou de fermentations. Il est essentiel que le combustible, comme la combustion, soient d'une excellente propreté, ce qui est peut-être la servitude la plus lourde. Les impuretés telles que monoxyde de carbone (à des niveaux de quelques milliardièmes) ou les composés sulfureux (à des niveaux de quelques milliardièmes) doivent être éliminés afin de n'utiliser que de l'hydrogène d'une pureté d'au moins 99,999 %. La nécessité de disposer d'une source d'hydrogène pur ne peut guère être satisfaite que dans les situations suivantes : ou bien nous disposons d'un réseau collectif

de distribution d'hydrogène pur, soit sous forme gazeuse (en canalisations) soit sous forme solide (en camions), ou bien nous fabriquons cet hydrogène localement, vraisemblablement par reformage de gaz naturel. Dans ces deux cas l'avantage économique des piles restera difficile à justifier, la production et la distribution d'hydrogène pur n'étant «gratuite» ni au plan énergétique ni au plan environnemental. Malgré les progrès déjà accomplis l'avenir des piles à combustible reste donc encore assez incertain.

I.6.3. Electrolyse de l'eau

L'électrolyse de l'eau est une réaction électrochimique de décomposition de l'eau en hydrogène et en oxygène. Pour ce processus nous appliquons une différence de potentiel entre les deux électrodes immergées au l'eau, qui crée un champ orienté dans lequel les ions se mettent en mouvement figure (I.15).

La dissociation de l'eau en hydrogène et oxygène nécessite un apport d'énergie électrique. Elle peut provenir d'énergies renouvelables : solaire, éolienne, hydraulique et biomasse, sachant que l'enthalpie de dissociation de l'eau est de 285 KJ/mole. Cela correspond à un potentiel théorique de 1.481 V à 25 °C. Dans la pratique, le potentiel nécessaire au processus se situe entre 1.7 à 2.3 V. Ceci correspond à des rendements de l'électrolyse de 70 à 85. [35]

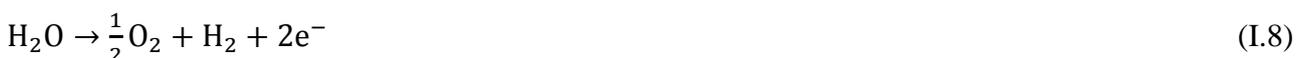


Figure(I.15): L'électrolyse de l'eau.

Quand la tension appliquée est suffisante des réactions se produisent aux interfaces électrolyte électrodes : [36].

À l'anode : Oxydation avec émission d'électrons

L'anode est l'électrode positive. Le processus qui s'y produit est l'oxydation : la molécule subit une perte en électrons. Chaque molécule se divise en oxygène (O₂) et produit un cation hydrogène (H⁺) en libérant des électrons qui se déplacent dans le circuit vers la cathode.



À la cathode : Réduction avec capture d'électrons

La cathode est l'électrode négative. Le processus qui s'y produit est la réduction : les protons, passent à travers la membrane, se recombinent avec les électrons pour donner l'hydrogène.

Réaction de la réduction à la cathode :



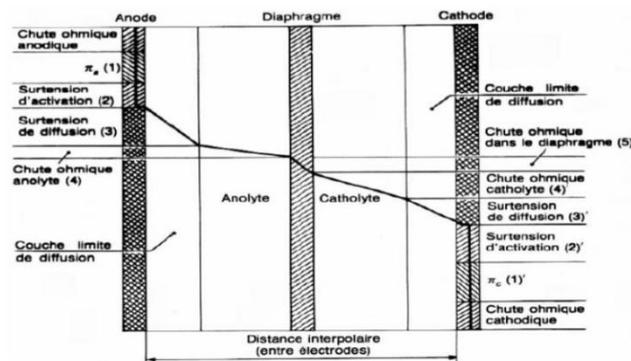
La réaction globale est :



I.6.3.1. Performances de l'électrolyseur

A. Tension pratique

Pratiquement, la tension d'électrolyse est toujours supérieure à la tension réversible à cause de l'ensemble des irréversibilités présentes dans le procédé. La figure I-16 présente de manière schématique l'ensemble de ces irréversibilités [30].



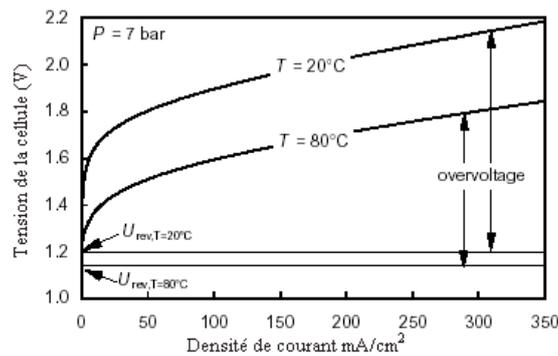
Figure(I.16) : Irréversibilités présentes dans une cellule d'électrolyse [37]

B. Effet de la température sur la tension d'électrolyse

Des études expérimentales menées sur l'électrolyse montrent que l'ensemble des irréversibilités présentes dans une cellule d'électrolyse diminue lorsque la température de fonctionnement de l'électrolyseur augmente. La résistance ionique, qui est prépondérante, diminue alors, permettant de diminuer la tension pratique de l'électrolyseur et donc sa consommation énergétique. En outre les réactions comme l'oxydation de l'eau en oxygène nécessitant d'être catalysées en raison de leur forte irréversibilité sont de même favorisées par un accroissement de la température [37][38].

L'augmentation de température est limitée par la tenue des matériaux de l'électrolyseur. Au delà d'une certaine température, il est nécessaire d'opérer l'électrolyse sous pression afin de réduire les pertes d'eau par évaporation.

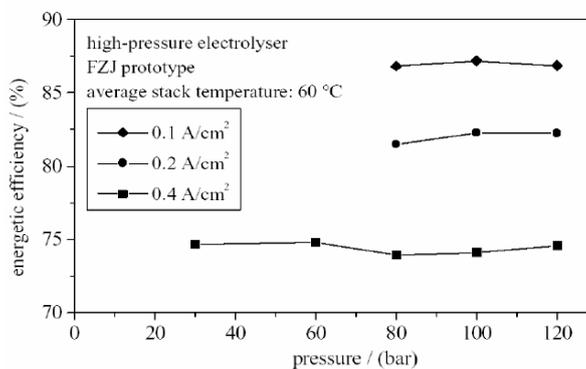
On peut observer sur cette figure la possibilité d'obtenir des rendements élevés, voire supérieurs à 100 % (à faible intensité) dans le cas où la chaleur serait apportée à la réaction de manière externe.



Figure(I.17): Influence de la température sur la tension de cellule d'un électrolyseur alcalin.

C. Effet de la pression sur la tension d'électrolyse

Bien que pour des raisons thermodynamiques, une augmentation de la pression tende à augmenter la tension de l'électrolyseur et donc à diminuer son rendement énergétique (Figure I.18), en pratique, l'influence de la pression sur la tension de cellule à densité de courant et température constantes dépend de la technologie de l'électrolyseur. Pour la technologie dite « zéro gap » (plaques bipolaires), on n'observe aucune influence de la pression et ce, dans une large gamme. Cette constatation pousse les industriels à développer des électrolyseurs à plaques bipolaires dont la pression de fonctionnement est supérieure à 30 bars. Ils peuvent ainsi s'affranchir d'un étage de compression, très énergivore, pour conditionner les gaz produits à 200 bars [39].



Figure(I.18): Influence de la pression sur la tension de cellule d'un électrolyseur alcalin à technologie 'zéro gap'.

D. Effet de la pression sur la pureté des gaz produits

La pureté des gaz (principalement l'oxygène) dépend à la fois de l'intensité et de la pression. La Figure (I.19) nous montre que la concentration de l'hydrogène dans l'oxygène augmente avec la pression. A faible intensité et à pression constante, le débit d'hydrogène produit est faible. Du fait de la petite taille des molécules d'H₂, ce gaz diffuse à travers la membrane pour se rendre du côté anodique où est produit l'oxygène. Ce phénomène est constant quelle que soit l'intensité.

L'oxygène produit est donc moins pur lorsque l'intensité est faible. Cette diffusion peut entraîner un risque d'explosion (si la concentration d'hydrogène dans l'oxygène atteint la valeur critique de 4% en volume).

C'est pourquoi on équipe habituellement les électrolyseurs de capteurs pour mesurer la concentration d'hydrogène dans l'oxygène produit. Enfin, on limite généralement le fonctionnement de l'électrolyseur à une intensité minimale et donc à une puissance minimale pour éviter la production d'un mélange explosif. Ce régime minimal augmente lui aussi avec la pression. Bien que l'augmentation de la pression de fonctionnement de l'électrolyseur soit favorable d'un point de vue énergétique (on peut s'affranchir d'une unité de compression pour le stockage des gaz produits, réduisant ainsi la consommation électrique du système), elle pénalise la qualité des gaz produits, à faible régime.

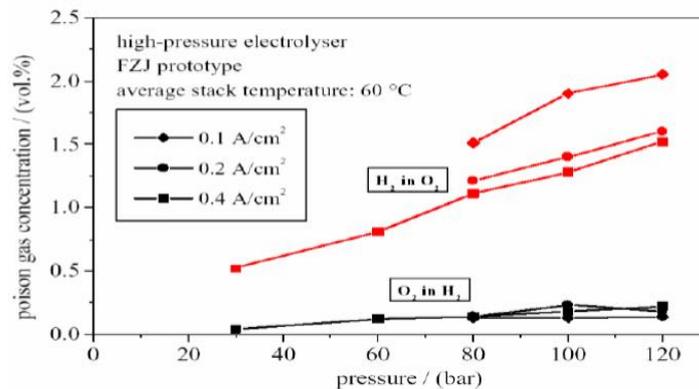
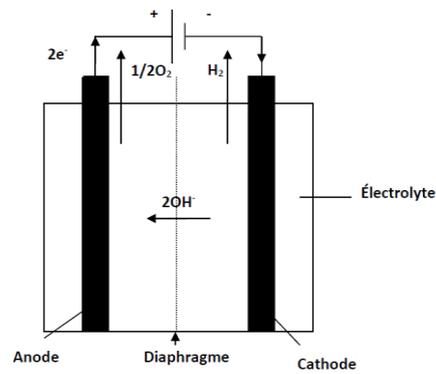


Figure I.19. Influence de la pression et de l'intensité sur la pureté des gaz produits par électrolyse alcaline.

[32]

I.6.3.2.Électrolyse alcaline

L'électrolyse alcaline est le procédé le plus employé dans l'industrie et est donc mature. Les électrolyseurs se présentent en modules de petite ou moyenne capacité (0,5-800 Nm³/h d'hydrogène), utilisant une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium (ou potasse) dont la concentration varie en fonction de la température (typiquement de 25% en masse à 80°C jusqu'à 40% à 160°C). La potasse est préférée à la soude, essentiellement pour des raisons de conductivité supérieure à niveaux de température équivalents, et de meilleur contrôle des impuretés chlorures et sulfates. Les modules comprennent généralement : une alimentation électrique, les cellules d'électrolyse, une unité de purification de l'eau, une unité de déshumidification des gaz, une unité de purification de l'hydrogène, un compresseur et un système de contrôle-commande. Certaines technologies d'électrolyseurs fonctionnent directement sous pression. Les modules de petite capacité opèrent typiquement de 3 à 30 bars. [31][40]. Le principe de ce type d'électrolyse est représenté sur la figure (I.20) :



Figure(I.20): Electrolyse alcaline

Les réactions sur les électrodes sont les suivantes :

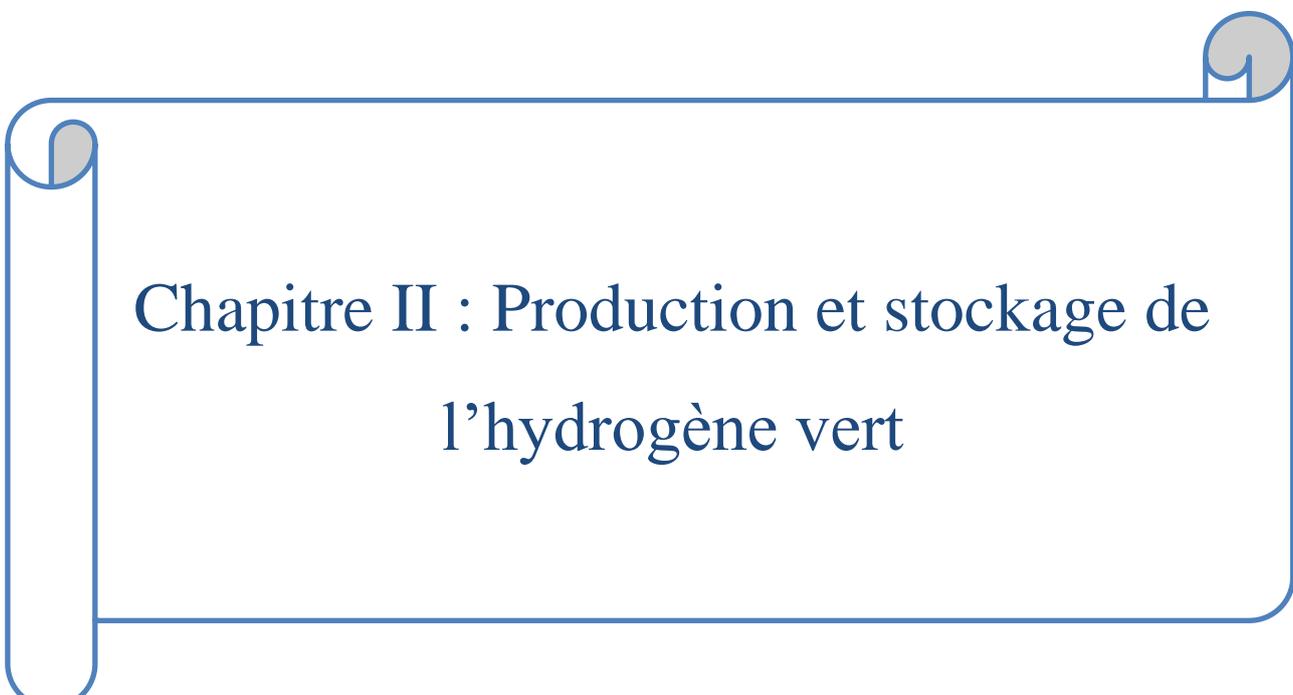


I.7. Avantages du système hybride

- Assurer une continuité de service du réseau électrique sans microcoupure.
- Réduction des coûts de consommation de carburant.
- Réduction des émissions de CO₂.
- Limitation du fonctionnement des groupes à faible charge.
- Allongement de la durée de vie des groupes électrogènes.
- L'installation et la mise en service s'opèrent dans un temps réduit. Réduction de la maintenance [41].

I.8. Conclusion

Dans ce travail on a choisi un système hybride purement renouvelable et propre 'PV/H₂/PAC' avec un système de stockage (Gaz d'hydrogène). Le dimensionnement et le fonctionnement de chaque source et l'objectif du chapitre suivant.



Chapitre II : Production et stockage de
l'hydrogène vert

II.1. Introduction

La production et le stockage de l'hydrogène vert sont des sujets importants dans le contexte de la transition énergétique et de la recherche de sources d'énergie plus propres et durables. L'hydrogène vert est produit en utilisant des méthodes d'électrolyse de l'eau alimentées par des sources d'énergie renouvelable, telles que l'énergie solaire, éolienne ou hydraulique. Voici quelques étapes clés dans la production et le stockage de l'hydrogène vert :

Production d'hydrogène vert: Électrolyse de l'eau: L'électrolyse de l'eau est le processus utilisé pour séparer l'hydrogène et l'oxygène de l'eau en utilisant une source d'électricité. L'électrolyse de l'eau peut se faire par électrolyse alcaline, électrolyse à membrane échangeuse de protons (PEM) ou électrolyse à haute température (SOEC).

Énergie renouvelable : Pour produire de l'hydrogène vert, il est essentiel d'utiliser des sources d'énergie renouvelable, comme des panneaux solaires, des éoliennes ou des centrales hydroélectriques, pour alimenter le processus d'électrolyse. Cela garantit que l'hydrogène est produit sans émissions de carbone.

Stockage de l'hydrogène vert : Compressé : L'hydrogène peut être comprimé et stocké sous haute pression dans des réservoirs spéciaux. Cela permet de stocker de grandes quantités d'hydrogène dans un espace réduit, mais cela nécessite des réservoirs solides et résistants pour gérer la haute pression.

- **Liquéfié :** L'hydrogène peut également être refroidi à des températures très basses (-253 °C) pour le liquéfier et le stocker dans des réservoirs cryogéniques. Le stockage sous forme liquide permet de stocker davantage d'hydrogène dans un volume réduit, mais nécessite des installations de stockage cryogéniques.
- **Hydrures métalliques :** Certains matériaux appelés hydrures métalliques peuvent stocker l'hydrogène de manière réversible. Ces matériaux absorbent l'hydrogène lorsqu'il est exposé à une certaine pression et le libèrent lorsqu'il est nécessaire. Cette méthode offre un potentiel de stockage plus sûr et plus compact, mais nécessite encore des recherches supplémentaires pour être pleinement développée.

Il convient de noter que la production et le stockage de l'hydrogène vert sont des domaines en évolution rapide, et de nouvelles technologies et méthodes émergent continuellement pour améliorer l'efficacité, la rentabilité et la durabilité de ces processus. La Modélisation, le contrôle et la Simulation d'un panneau photovoltaïque

De même il est important de signaler que le stockage ne rentre pas dans notre plan de travail dans l'aspect de son étude détaillée, mais c'est juste à introduire la notion de réservoir de stockage liée à la charge catalyseur.

II.2. Modélisation du panneau photovoltaïque

Un module PV se compose d'un certain nombre de cellules solaires connectées en série et en parallèle pour obtenir les niveaux de tension et de courant désirés. Une cellule de panneau solaire est essentiellement une jonction de semi-conducteur p-n [42].

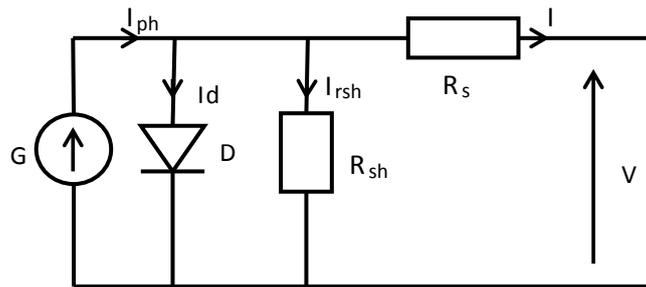


Figure (II.1) : circuit équivalent à une diode d'une cellule PV[42]

Le circuit équivalent du modèle général se compose d'un photo-courant (I_{ph}), d'une diode, d'une résistance parallèle (R_{sh}) exprimant un courant de fuite et d'une résistance série (R_s) due aux contacts entre les semi-conducteurs et les parties métalliques, comme sur la figure (II.1). En appliquant la loi de Kirchhoff, le courant sera obtenu par l'équation suivante: [43]

$$I = I_{ph} - I_d - I_{rsh} \quad (II.1)$$

Avec :

I_{ph} : est un courant généré par la lumière ou la photo courant. est donnée par l'équation suivante :

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i \cdot (T - 298)] \cdot \frac{G}{1000} \quad (II.2)$$

I_{rsh} : courant qui circule dans la résistance parallèle, est donnée par l'équation suivante :

$$I_{rsh} = \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (II.3)$$

I_d : est le courant

de la diode, il est donné par l'équation suivante :

$$I_d = I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{n \cdot K \cdot N_s \cdot T}\right) - 1 \right] \quad (II.4)$$

I_0 : courant de saturation de la diode (A) .

q : charge élémentaire ($1.6 \cdot 10^{-19}$ C) .

K : constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}$ (SI)) .

n : coefficient d'idéalité de la cellule ;.

N_s : nombre de cellules connectées en série .

I_0 : courant de saturation de la diode donné par :

$$I_0 = I_{rs} \cdot \left(\frac{T}{T_n}\right) \cdot \exp \left[\frac{q \cdot E_{g0} \cdot \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T}\right)}{n \cdot K} \right] \quad (\text{II.5})$$

Avec :

E_{g0} : est l'énergie de gap du semi-conducteur utilisé dans la cellule en électronvolt (eV) .

I_{rs} : Le courant de saturation I_{rs} de la diode pour la température T_n , est donné par :

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\frac{q \cdot V_{oc}}{e \cdot n \cdot K \cdot N_s \cdot T - 1}} \quad (\text{II.6})$$

Avec :

V_{oc} : est la tension en circuit ouvert .

Nous remplaçons dans l'équation (1), l'équation caractéristique tension-courant d'une cellule solaire est donnée comme suit :

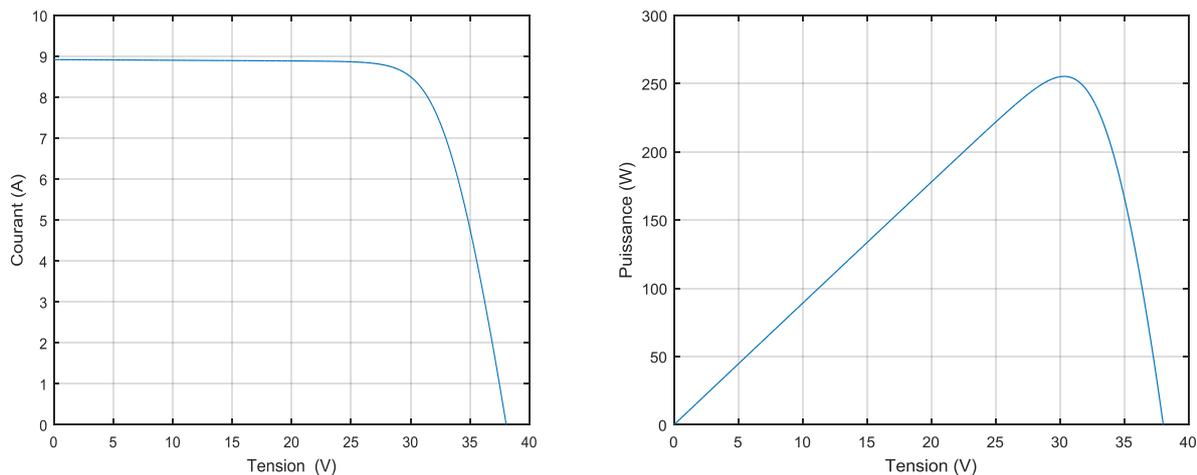
$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left[\exp \left(\frac{V + I \cdot R_s}{n \cdot K \cdot N_s \cdot T} \right) - 1 \right] - I_{rsh} \quad (\text{II.7})$$

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

$$P = V \cdot I_{ph} - V \cdot I_0 \cdot \left[\exp \left(\frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{n \cdot K \cdot N_s \cdot T} \right) - 1 \right] - V \cdot I_{rsh} \quad (\text{II.8})$$

Dans la description generale d'un panneau photovoltaïque, l'allure generale de la caractéristique d'un panneau photovoltaïque sous conditions standart 1000W/m² et 25°C est de la forme suivate :

La figure (II.2). représente les caractéristiques courant-tension I_{pv} (V_{pv}) du module PV pour un éclairage et une tension donnée ($G_n = 1000\text{W}/\text{m}^2$, $T_n=25^\circ\text{C}$).



Figure(II.2): Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ et $P (V_{pv})$ dans les conditions standards

On remarque dans la caractéristique (courant-tension) que le module photovoltaïque possède trois zones de fonctionnement qui sont :

La zone (1) : le courant reste presque constant quel que soit la tension, pour cet intervalle, le module photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.

La zone (2) : qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension.

La zone (3) : correspond au coude de la caractéristique, la région intermédiaire en les deux zones précédentes, elle représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, ou le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.

II.2.1. Etude de la source photovoltaïque du système

Pour entamer la conception du système de production de l'hydrogène vert il est important de faire un choix judicieux du panneau solaire photovoltaïque qui va alimenter l'électrolyseur par l'électricité nécessaire à l'opération Electrolyse. Pour cela le modèle retenu est à une diode et deux résistances R_{set} R_{sh} d'une puissance crête de 250W avec les caractéristiques suivantes :

panneau de marque SIEMENS SM 110-24 de 110 W. avec les paramètres ci-dessous [44] :

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

Tableau(II.1): Paramètres caractéristiques du panneau photovoltaïque utilisé dans le système

II.2.2. Commande MPPT du PV

De nombreux algorithmes ont été élaborés pour améliorer le MPPT en fonction d'une utilisation spécifique. Perturber et observer est l'un des plus couramment utilisés. C'est une méthode itérative pour obtenir le point de puissance maximum MPPT en mesurant les valeurs des caractéristiques d'un panneau photovoltaïque, Cet algorithme mesure les entrées de tension et de courant et incrémente ou décrémente arbitrairement la tension. Ensuite, les nouvelles données sont comparées aux lectures précédentes. Si la puissance augmente la tension est déplacée dans le même sens que le dernier réglage. Cela continue jusqu'à ce que la nouvelle valeur affiche moins de puissance que la précédente. La direction est ensuite modifiée pour essayer d'atteindre la puissance d'entrée de crête.

La figure(II.3). représente Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension V_{pv} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{pv} .

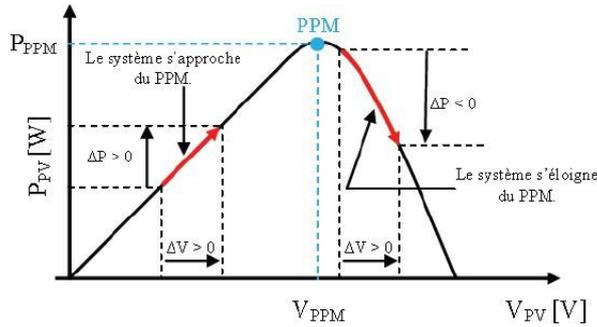


Figure (II.3): Caractéristique de P_{pv} en fonction de la tension V_{pv} d'un panneau solaire [45].

La figure(II.4) représente l'algorithme à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (mesurant le courant et la tension des panneaux PV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant.

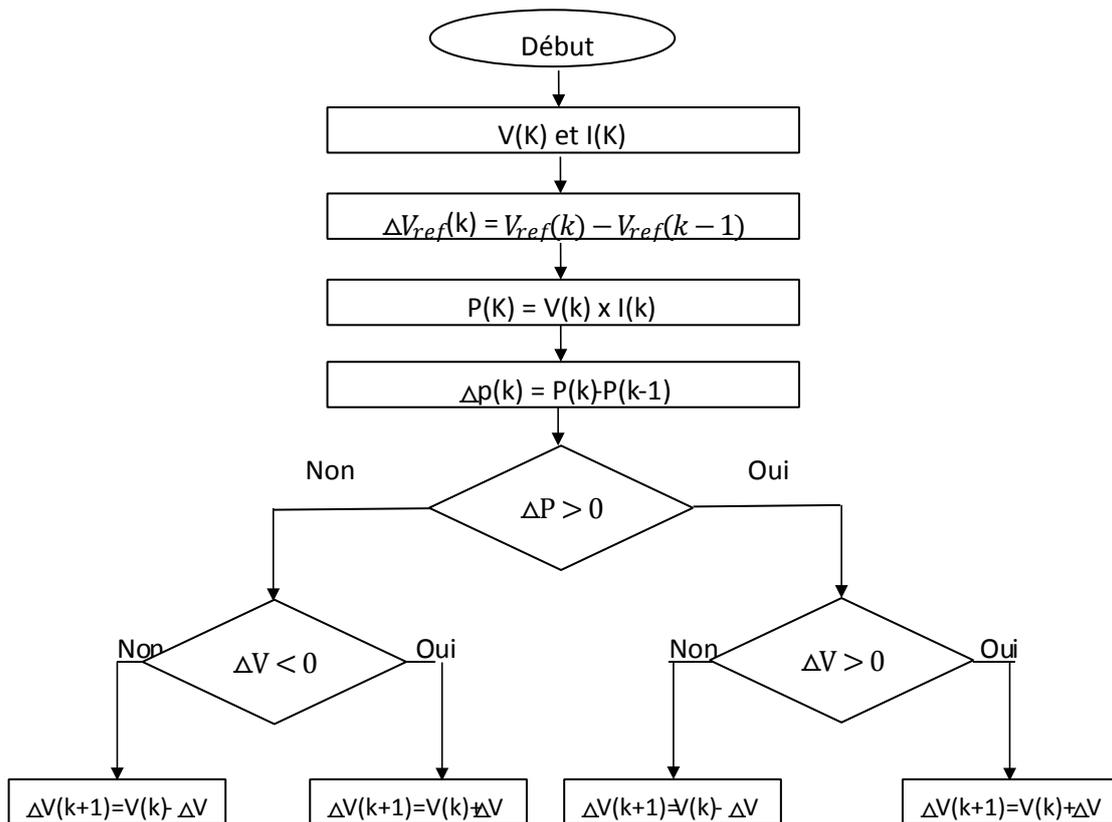
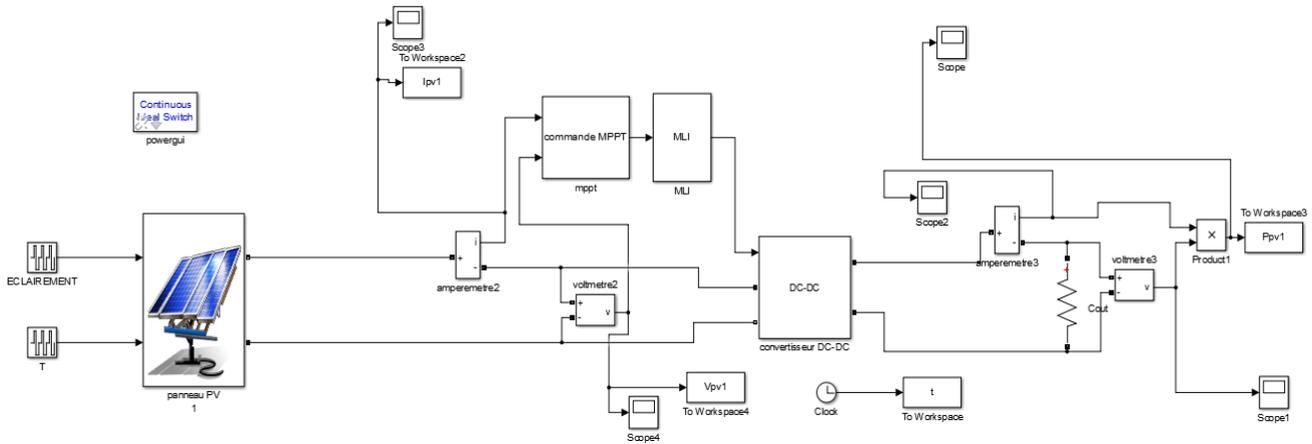


Figure (II.4): Algorithme de la méthode P&O

II.2.3. Résultats et interprétations

La simulation du système sous commande MPPT avec PO à partir paramètres standard de module PV sous environnement Matlab-Simulink est à la base de cette partie pour estimer le comportement de cette source renouvelables sous conditions standart.

La figure ci-dessous présente le schéma sous Matlab-Simulink du système photovoltaïque avec la commande MPPT suivant l'Algorithme PO .



Figure(II.5): Simulation d'un panneau PV avec la commande MPPT

II.2.3.1. Influence de la température

L'influence de la température est importante et a des conséquences pour la conception des panneaux et des systèmes photovoltaïques. La température est un paramètre essentiel puisque les cellules sont exposées aux rayonnements solaires, susceptibles de les échauffer. De plus, une partie du rayonnement émis n'est pas convertie en énergie électrique il se dissipe sous forme de chaleur. Pour voir l'influence de la température, nous avons tracé les caractéristiques P_{pv} - V_{pv} et I_{pv} - V_{pv} comme les figures (II.6)(II.7) , pour des différentes températures, et avec un ensoleillement constant $G=1000 \text{ W/m}^2$.

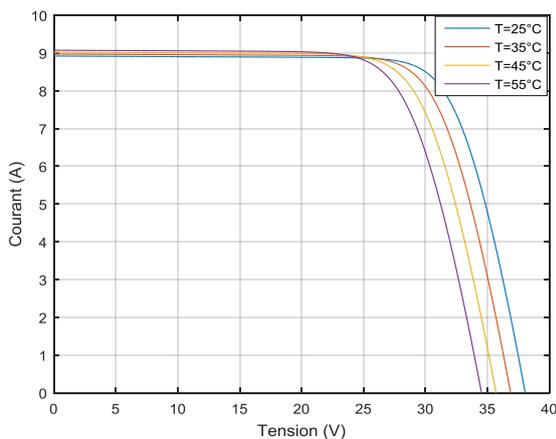


Figure (II.6) : Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$

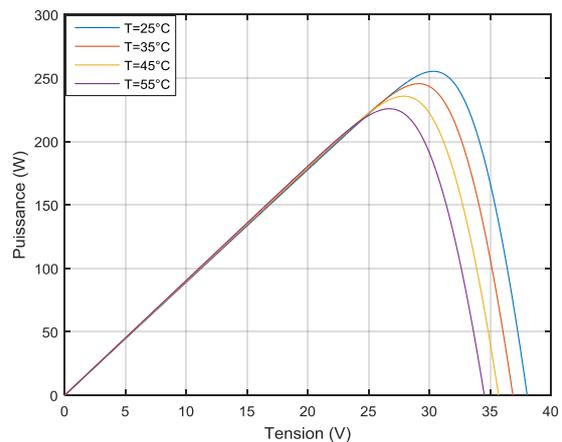


Figure (II.7) :Influence de la température sur la caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$

On remarque, que lorsque la température augmente, le courant photogénéré augmente très légèrement alors que la tension de circuit ouvert diminue considérablement, de même pour la puissance, on peut remarquer aisément que l'influence de la température est flagrante sur la tension au dépend d'une influence minimale sur le courant.

II.2.3.2- Influence de l'éclairement

L'énergie électrique produite par un panneau dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. Les figures qu'on voit ci-dessous représentent les caractéristiques I-V et P-V de la cellule PV avec variation de l'éclairement, à une température constante $T = 25^\circ\text{C}$.

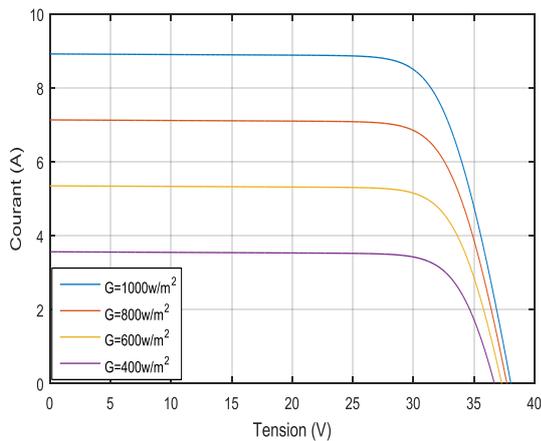
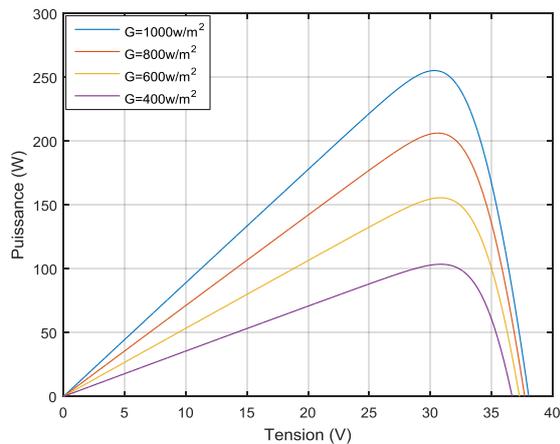


Figure (II.8) : Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$



Figure(II.9): Influence de l'éclairement sur la caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$

On remarque que la variation de l'éclairement influe visiblement sur le courant et un peu moins sur la tension par conséquent la variation proportionnelle à l'éclairement, ce qui donne une influence inverse au sens de la température. Ces résultats impliquent la bonne démarche de la simulation du modèle adopté du PV du fait qu'ils sont pratiquement semblables à ceux publiés dans la littérature.

En outre les variations obtenus donnent une valeur de puissance crête typique à celle signalée dans le panneau commercialisée utilisé dans la simulation.

II.2.4. Caractéristique électrique du module photovoltaïque avec l'algorithme MPPT

Le fonctionnement du panneau PV 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), est utilisé pour maintenir le point de fonctionnement du panneau photovoltaïque au point de sa puissance maximale. Le MPPT permet de réaliser par le contrôle du courant et la tension du photovoltaïque, indépendamment des courants et tensions de la charge.

L'application de la commande MPPT basée sur la méthode de perturbation et observation (P&O) sous conditions Standart ($1000\text{W}/\text{m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$) a aboutit au résultats suivants :

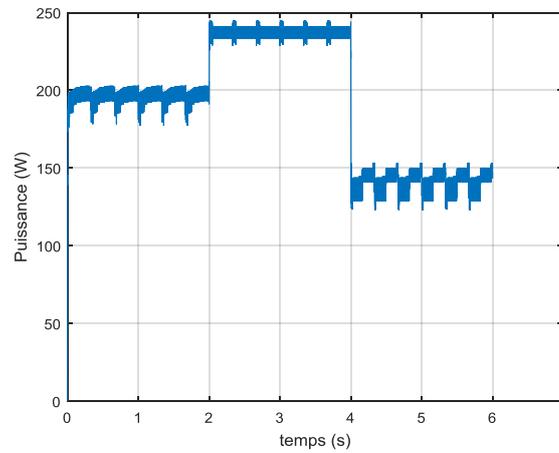


Figure (II.10): Effet de la commande MPPT sur la puissance du panneau PV

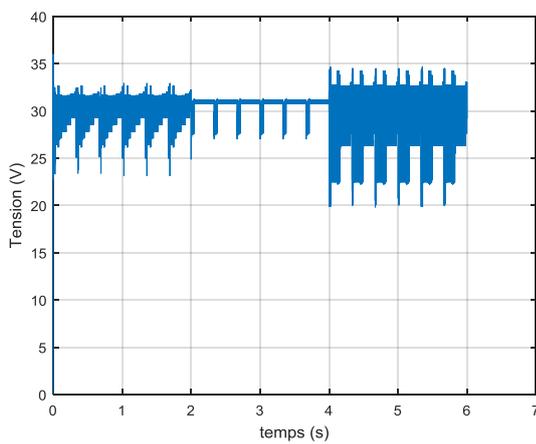


Figure (II.11) : Effet de la commande MPPT sur la tension du panneau PV

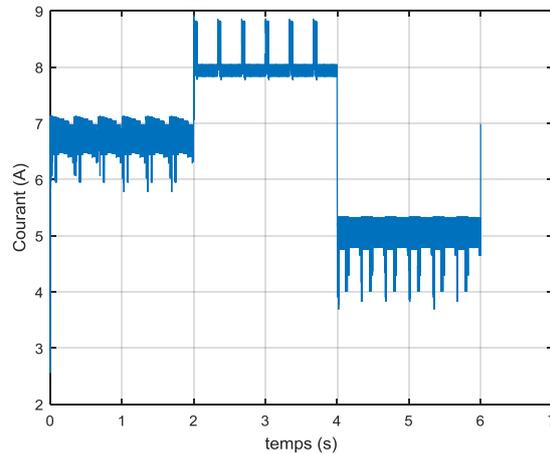


Figure (II.12) : Effet de la commande MPPT sur le courant du panneau PV

II.2.5. Analyse des résultats

L'influence de la température et de l'éclairement G est maîtrisée par la commande MPPT par PO pour la puissance est maintenue à son maximum pour un interval de temps répartie sur trois cycles de variation [0s 2 s]; [2s 4s] et [4s 6s].

II.3. Modélisation de l'Electrolyseur

Un électrolyseur est un dispositif qui utilise l'énergie électrique pour faire des réactions chimiques. Dans le cadre de notre étude, les électrolyseurs employés réalisent l'électrolyse de l'eau afin de produire de l'hydrogène. il est défini comme une appareil qui sépare l'eau ($2\text{H}_2\text{O}$) en hydrogène (2H_2) et oxygène (O_2) selon l'équation (II.9).



L'électricité est nécessaire pour le processus de production d'hydrogène. Les caractéristiques U-I d'un électrolyseur avancé sont définies comme [46] :

$$V_{\text{élec-Cell}} = V_{\text{rév}} + \frac{r_1 + r_2 T}{A} I + K_{\text{éle}} \ln \left(\frac{K_{T1} + \frac{K_{T2}}{T} + \frac{K_{T3}}{T^2}}{A} I + 1 \right) \quad (\text{II.10})$$

Avec :

$V_{\text{élec-Cell}}$: la tension aux bornes de la cellule (V) ;

$V_{\text{rév}}$: la tension réversible de cellule (V) ;

r_1, r_2 : les paramètres de résistance ohmique ($\Omega \cdot \text{m}^2, \Omega \cdot \text{m}^2/\text{°C}$) ;

$K_{\text{éle}}, K_{T1}, K_{T2}, K_{T3}$: les paramètres de surtension V, $\text{m}^2/\text{A}, \text{m}^2 \cdot \text{°C}/\text{A}, \text{m}^2 \cdot \text{°C}^2/\text{A}$;

La tension minimale ou réversible $V_{\text{rév}}$ d'une cellule d'électrolyseur correspond à l'énergie libre (ΔG) nécessaire pour décomposer la molécule d'eau, elle est donnée par la formule suivante :

$$V_{\text{rév}} = -\frac{\Delta G}{2F} \quad (\text{II.11})$$

Δ : est l'énergie libre de la réaction d'électrolyse (J/mol) ;

F : La constante de Faraday (96.487 C/K.mol) ;

$V_{\text{rév}}$: peut être exprimé comme une équation empirique comme :

$$V_{\text{rév}} = V_{\text{rév}}^0 - K_{\text{rév}}(T - 25) \quad (\text{II.12})$$

Avec :

$V_{\text{rév}}^0$: est la tension de cellule réversible à l'état standard (V) ;

$K_{\text{rév}}$: est coefficient empirique de température de $V_{\text{rév}}$ (V/°C) ;

Pour un électrolyseur constitué de n_c cellules en série, la tension de sortie est définie comme :

$$V_{\text{élec}} = n_c \cdot V_{\text{élec,cell}} \quad (\text{II.13})$$

II.3.1. Débit de production d'Hydrogène

Selon la loi de Faraday, le taux de production d'hydrogène dans une cellule d'électrolyseur est directement proportionnel au taux de transfert d'électrons aux électrodes, le taux de production totale d'hydrogène dans un électrolyseur, composé de plusieurs cellules connectées en série, peut être exprimé une [46] :

$$\dot{n}_{\text{H}_2, \text{prod}} = \eta_F \frac{N_c I}{2F} \quad (\text{II.14})$$

Avec :

\dot{n}_{H_2} : débit de production d'Hydrogène (mole/sec) ;

η_F : rendement faradique ;

Rendement Faradique : est le rapport entre la quantité réelle et théorique de production maximale d'hydrogène. Une empirique l'expression pour la représentation de l'efficacité faraday est donnée par [47] :

$$\eta_F = \frac{\left(\frac{1}{A}\right)^2}{f_1 + \left(\frac{1}{A}\right)^2} f_2 \quad (\text{II.15})$$

Avec : f_1 , f_2 : ($\text{mA}^2 \text{ cm}^{-4}$) , paramètres de calcul du rendement Faradique, Objectif de la ventilation électrolyseur pour maintenir une température constante du système.

II.3.2. Modèle thermique :

La température de fonctionnement de l'électrolyseur affecte ses performances. Le taux de variation de température de l'électrolyseur est proportionnel à la différence de taux de chaleur généré \dot{Q}_{gen} , moins la perte de chaleur \dot{Q}_{loss} , et refroidissement chaleur \dot{Q}_{cool} , peut être exprimé comme [47] :

$$C_t \frac{dT}{dt} = \dot{Q}_{\text{gen}} - \dot{Q}_{\text{loss}} - \dot{Q}_{\text{cool}} \quad (\text{II.16})$$

Avec :

C_t : est la capacité thermique globale de l'électrolyseur ;

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

$$\dot{Q}_{\text{gen}} = \eta_c (V - V_{\text{th}}) \cdot I \quad (\text{II.17})$$

Avec :

$$V_{\text{th}} = -\frac{\Delta H}{2F}, \text{ est la tension thermique} \quad (\text{II.18})$$

\dot{Q}_{pert} : la perte de puissance calorifique. elle peut être déterminée par

$$\dot{Q}_{\text{pert}} = \frac{1}{R_t} (T - T_a) \quad (\text{II.19})$$

R_t : est résistance thermique de l'électrolyseur ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$) ;

T_a : est la température ambiante ($^{\circ}\text{C}$) ;

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

$$\dot{Q}_{\text{refroidissement}} = C_{\text{cm}} (T_{\text{cm,s}} - T_{\text{cm,e}}) \quad (\text{II.20})$$

Avec :

C_{cm} : est la capacité thermique de l'eau de refroidissement ($\text{J}/^{\circ}\text{C}$) ;

$T_{\text{cm,e}}$: est la température de l'eau de refroidissement d'entrée ($^{\circ}\text{C}$) ;

$T_{\text{cm,s}}$: est la température de l'eau de refroidissement de sortie, peut être exprimée :

$$T_{\text{cm,s}} = T_{\text{cm,e}} + (T - T_{\text{cm,e}}) \left(1 - \exp\left(-\frac{V_{\text{AHX}}}{C_{\text{cm}}}\right)\right) \quad (\text{II.21})$$

Avec :

Chapitre II : Production et stockage de l'Hydrogène vert

V_{AHX} : coefficient d'échange calorifique effective pour le processus de refroidissement, peut être exprimée par :

$$V_{AHX} = h_{cond} + h_{conv} \cdot I \quad (II.22)$$

h_{cond} : coefficient relatif à l'échange de chaleur en conduction (W/°C) ;

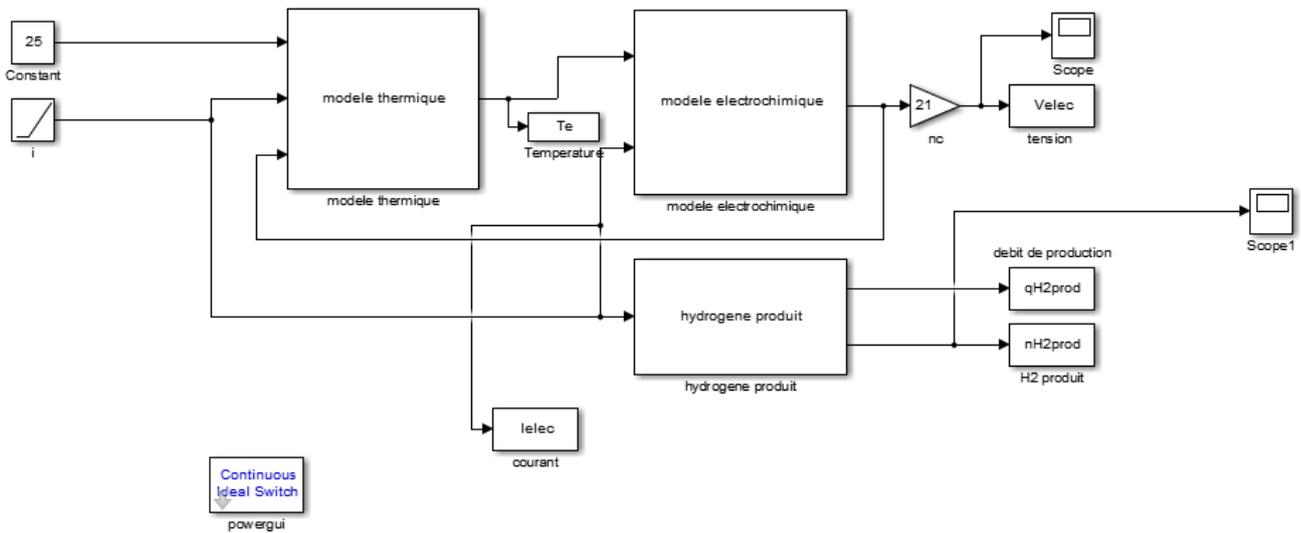
h_{conv} : coefficient relatif à l'échange de chaleur en convection (W/ (°C.A))

II.3.3. Implémentation du modèle d'électrolyseur dans Matlab/Simulink

Sur la base des équations mathématique 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 le tableau suivant [74] :

| Paramètres | | Valeur |
|---|------------|--|
| Tension réversible de la cellule | U_{rev} | 1.23V |
| Coefficient de température | K_{rev} | $1.93 \cdot 10^{-3} V/^{\circ}C$ |
| Résistance ohmique | r_1 | $7.3 \cdot 10^{-5} \Omega \cdot m^2$ |
| | r_z | $-1.1 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot m^2 /^{\circ}C$ |
| Paramètres de surtension | s | 0.185 V |
| | t_1 | -1.002m ² /A |
| | t_2 | 8.424m ² °C/A |
| | t_3 | 247.3m ² °C ² /A |
| Surface effective | A | 0.25m ² |
| Paramètres de calcul du rendement Faradique | f_1 | $250 mA^2/cm^4$ |
| | f_2 | 0.96 |
| Coefficient de transfert de chaleur | h_{conv} | 0.02 W/°C.A |
| | h_{cond} | 7 W/°C |
| Capacité thermique | C_t | 625 KJ/°C |
| Résistance thermique | R_t | 0.167° C/W |

Tableau (II.2): Paramètres électrique d'un électrolyseur [74]



Figure(II.13) : Simulation d'un électrolyseur sous Matlab/Simulink .

II.3.3.1. Caractéristiques d'électrolyseur

La figure. II.14 représente la variation de la tension en fonction de courant avec une température constante $T= 25\text{ C}^\circ$. D'après cette courbe que les caractéristiques d'électrolyseur sont non linéaires, On peut distinguer trois partie différents sur la courbe caractéristique V-I, la premier partie la tension augmente en une fonction exponentielle et immédiatement, la deuxième partie elle se manifeste sous forme linéaire, et dans la dernière partie la forme du signal de la tension se présente sous forme non linéaire.

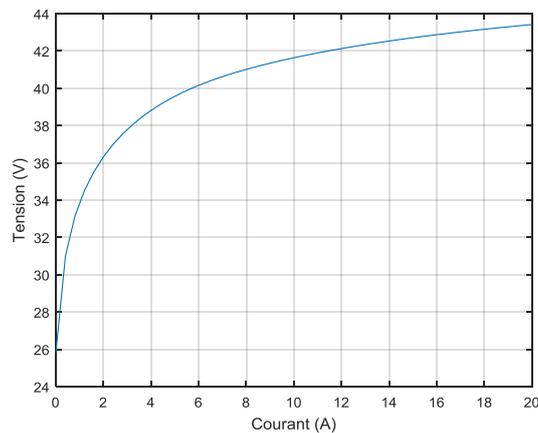
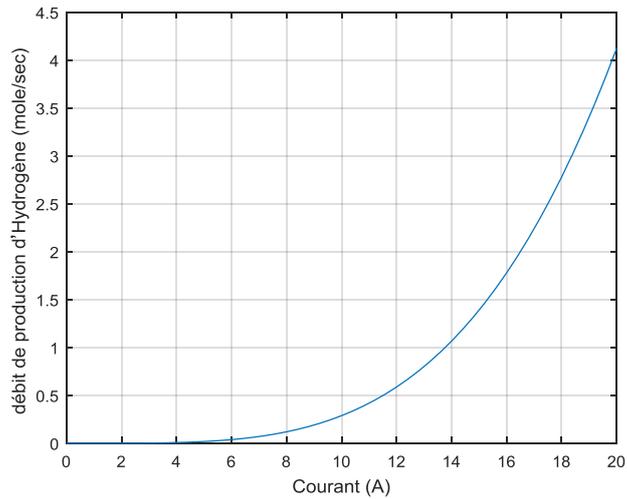


Figure (II.14): Caractéristique V-I d'électrolyseur



Figure(II.15): caractéristique variation du débit d'hydrogene avec le courant entrant I-nH2pro par l'électrolyseur

II.3.3.2. Influence de la Température

L'électrolyseur est sensible à la température. Pour voir l'influence de cette dernière, nous avons tracé les caractéristiques Ipv-Vpv comme la figure II.16. pour des différentes températures.

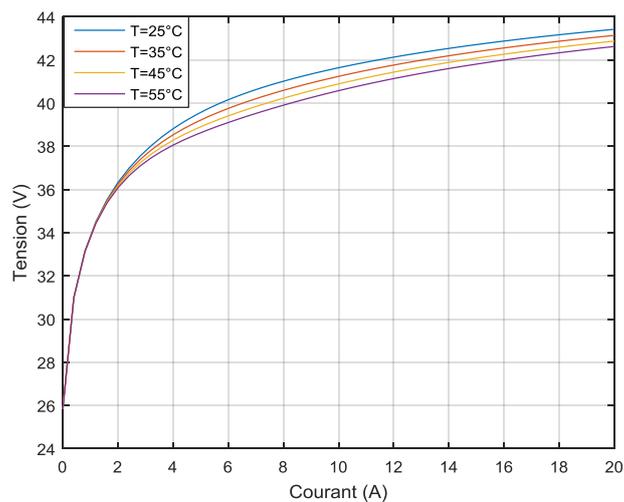


Figure (II.16): influence de la température sur la caractéristique I-V de l'électrolyseur

II.4. Modélisation de 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. Le nombre de moles stockées dans le réservoir, est exprimé comme suit [48].

$$n_{H_2} = \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} (n_{H_2,pro} - n_{H_2,req}) dt + n(t_0) \quad (II.23)$$

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[48].

❖ **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 [49][50].

$$P_b - P_{bi} = z \times \frac{q_{H_2}RT_b}{M_{H_2}V_b} \tag{II.24}$$

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.

$$z = \frac{PV_m}{RT} \tag{II.25}$$

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

II.5. Modélisation des éléments de stockage d'énergie

Pour la modélisation on représente une batterie par le circuit électrique suivant:

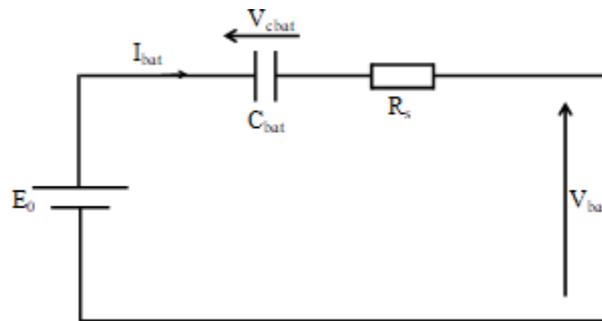


Figure (II.17): Modèle R-C de la batterie

Ce modèle comprend une E_0 modélisant la tension a vide de la batterie, un condensateur modélisant la capacité interne de la batterie (C_{bat}) et une résistance interne (R_s).

La tension aux bornes de la batterie donnée par [51] :

$$V_{bat} = E_0 - R_s \cdot I_{bat} - V_{cbat} \tag{II.26}$$

On définit également l'état de charge (EDC) de la batterie par :

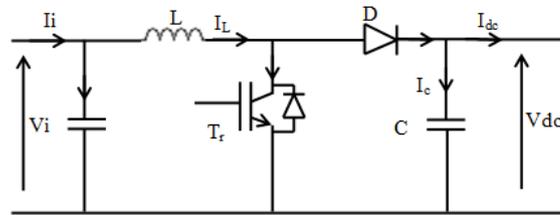
$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_{bat}} \tag{II.27}$$

Q_d : la quantité de charge manquante par rapport à C_{bat} ;

C_{bat} : la capacité (Ah) nominale de la batterie ;

II.6. Modélisation du hacheur boost (élevateur)

La tension de sortie du module photovoltaïque et de la pile à combustible sont élevées en utilisant Le convertisseur Boost, la tension de sortie est toujours supérieure à la tension d'entrée. La figure (II.6) représente la structure d'un hacheur de type Boost utilisé lorsqu' on désire augmenter la tension disponible d'une source continue [52] :



Figure(II.18): schéma de hacheur type boost [52]

En mode de conduction continue le fonctionnement de ce convertisseur peut être divisé en deux phases selon l'état du transistor Tr.

Dans la première phase Tr est passant, la tension aux bornes de l'inductance vaut

$$V_L = V_i \quad (\text{II.28})$$

le courant traversant l'inductance augmente linéairement ; dans la deuxième phase le transistor est bloqué, la diode devient passante. La tension aux bornes de l'inductance vaut

$$V_i = V_L + V_{dc} \quad (\text{II.29})$$

Dans cette phase le condensateur C se charge en même temps par le courant stocké dans l'inductance et par le générateur. Les équations électriques du hacheur boost sont [52] :

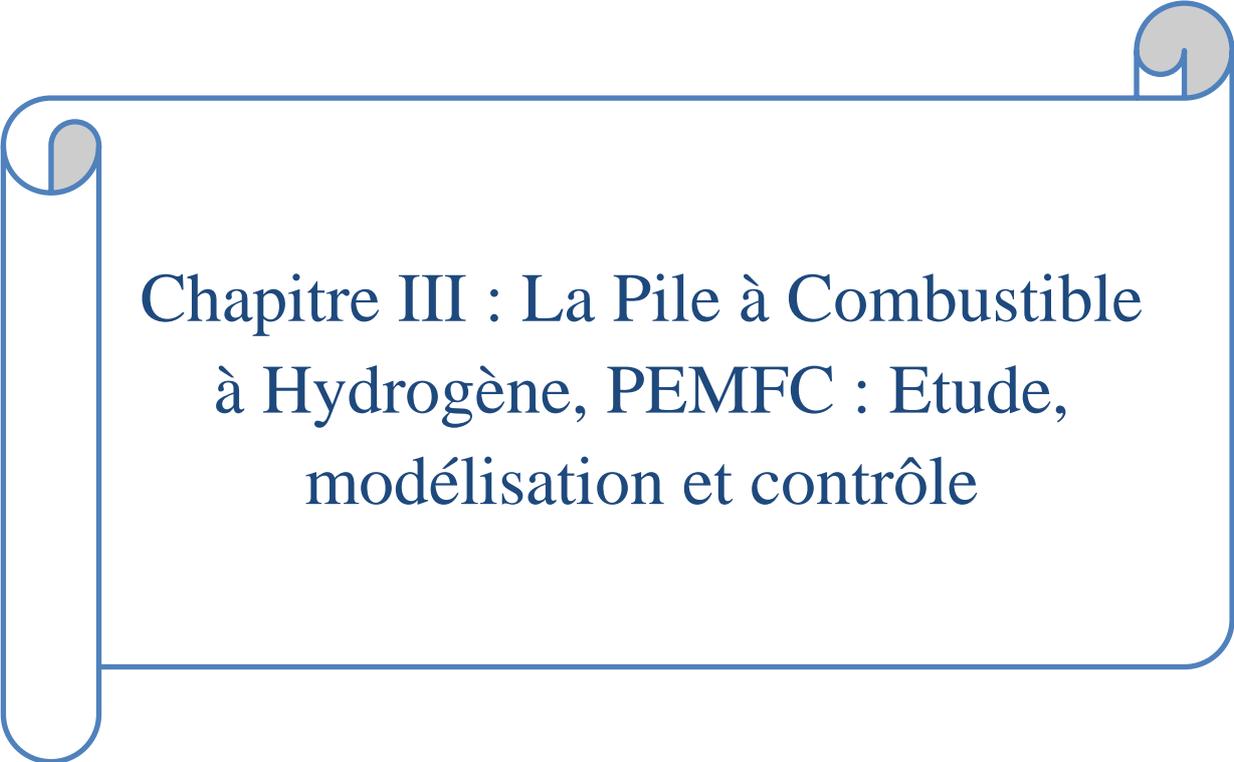
$$V_i = L \cdot \frac{dI_L}{dt} + (1 - a) \cdot V_{dc} \quad (\text{II.30})$$

$$(1 - a) \cdot I_L = C \cdot \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{dc} \quad (\text{II.31})$$

a : le rapport cyclique ;

II.7. Conclusion

Dans ce chapitre, c'est présenté la modélisation mathématique d'un système composé d'un panneau photovoltaïque et l'électrolyseur pour produire l'hydrogène dans le réservoir de stockage. Enfin un modèle mathématique du hacheur est présenté. Cette modélisation est une étape essentielle permet d'introduire un certain nombre de modèles puis évaluer la caractéristique de chaque élément d'un système hybride.



**Chapitre III : La Pile à Combustible
à Hydrogène, PEMFC : Etude,
modélisation et contrôle**

III.1.Introduction

Le choix de la pile de type PEMFC comme modèle adopté pour notre étude est justifié et ciblé du fait que la pile est distinguée par des caractéristiques très spécifiques par rapport aux autres notamment sa performance avec la variation de la température de 60°C à 100 °C et la robustesse du comportement de sa membrane échangeuse sous différentes conditions de fonctionnement.

Les modifications des conditions d'exploitation peuvent avoir des effets favorables ou défavorables à la pile ce qui nécessite une étude spécifique à travers sa modélisation dans différents aspects notamment le modèle électrique et le modèle thermique. Le contrôle de la pile forme une importance major pour une pile performante en tenant en compte tous les paramètres qui entrent en jeux à l'entrée comme le débit d'hydrogène et l'oxygène, la température interne et l'humidification de la membrane. Le présent chapitre s'intéresse à ces aspects de modélisation et de contrôle.

III.2. Modélisation de la pile PEMFC

Pour les piles à combustible avec un électrolyte conducteur de protons (PEMFC), l'hydrogène est oxydé à l'anode et les protons sont transportés à travers la membrane vers la cathode selon la réaction:



Et à la cathode, l'oxygène est réduit selon la réaction:



Les électrons circulent par le circuit externe durant ces réactions. Une fois arrivés à la cathode, les protons se recombinaient avec les ions oxygène pour former de l'eau selon la réaction:



III.2.1 Modèle de tension

Il existe un grand nombre de modèles quasi statiques pour décrire la réaction chimique Présentée dans une cellule de pile à combustible. Dans le cadre de cette étude, le modèle d'évolution de la tension choisi est issu des travaux présentés par Amphlett. [53] Ce modèle est décrit en utilisant la combinaison des lois élémentaires et des modèles Empiriques .

Dans le développement des modèles élémentaires, les transports de matière sont pris en compte via les équations de Maxwell. Les potentiels d'équilibre thermodynamique sont définis en utilisant l'équation de Nernst. Les surtensions d'activation sont calculées par les équations de Tafel.,[53]

La résistance interne est déterminée par les équations de Nernst-Planck.[53] En utilisant la loi d'Ohm, nous pouvons exprimer la tension de cellule par :

$$V_{cell} = E_{nerst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (III.4)$$

Les pertes, appelées souvent polarisation, proviennent principalement de trois sources: la Polarisation d'activation (V_{act}), la polarisation ohmique (V_{ohm}) et de la polarisation de Concentration (V_{conc}). Ces pertes entraînent, pour une pile de potentiel idéal (E_{nerst}), une chute de la tension: [54]

$$V_{cell} = E_{nerst} - \text{pertes} \quad (III.5)$$

E_{nerst} Dite tension réversible : est le potentiel d'équilibre thermodynamique défini en Utilisant l'équation de Nernst.

$$E_{nernst} = \frac{\Delta G}{2F} - \frac{\Delta S}{2F}(T - T_{ref}) + \frac{RT}{2F} \left[\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2}) \right] \quad (III.6)$$

Avec :

P_{H_2}, P_{O_2} : Sont respectivement les pressions partielles de hydrogène et l'oxygène (atm).

ΔG : Le changement d'énergie libre (J/K.mol) .

ΔS : Le changement d'entropie (J/K.mol) .

F : La constante de Faraday (96.487 C/K.mol) .

T : La température absolue opérationnelle

T_{ref} : La température de référence (K) .

R : La constante universelle des gaz parfaits (8.314 J/K.mol).

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

$$E_{nernst} = 1.229 - 0.85 \cdot 10^{-3}(T - 298.15) + 4.31 \cdot 10^{-5} \cdot T \left[\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2}) \right] \quad (III.7)$$

On peut distinguer sur la courbe caractéristique de la pile PEMFC, trois domaines différents, qu'on appelle également courbe de polarisation :

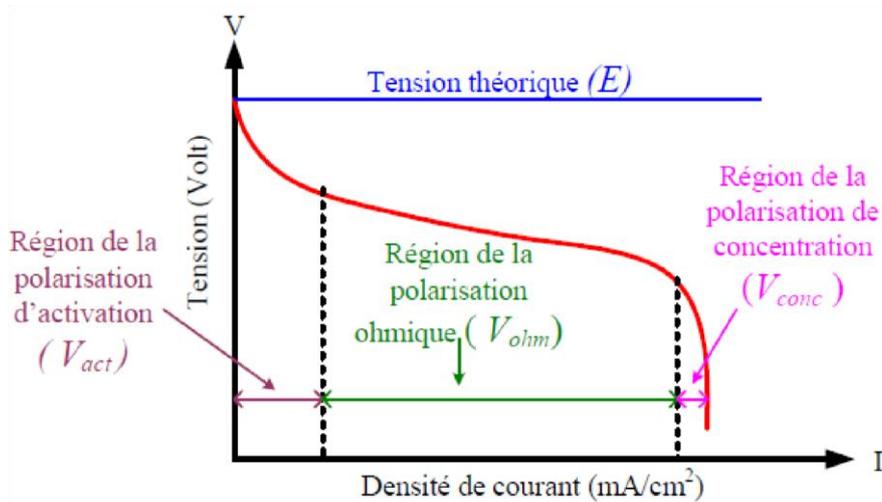


Figure (III .1) . Caractéristique de polarisation théorique du PAC [53].

Il faut noter que la température de la membrane et les pressions partielles du gaz varient en fonction du courant: avec l'augmentation du courant les pressions d'hydrogène et de l'oxygène diminuent, bien que la température augmente.

- **Polarisation d'activation (Charge transfert kinetics) :**

La polarisation d'activation est donnée par la relation de Tafel: [53]

$$V_{act} = -[\xi_1 + \xi_2 \cdot T + \xi_3 \cdot T \cdot \ln([C_{O_2}])] + \xi_4 \ln(I_{stack}) \quad (III.8)$$

Avec:

I_{stack} : Est le courant de fonction de la pile,

$\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4$: représentent les coefficients paramétriques pour chaque modèle de pile. [53]

C_{O_2} : Est la concentration de l'oxygène dans l'interface du catalyseur de la cathode donnée par la relation :

$$C_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{5.08 \cdot 10^6 \cdot e^{\left(\frac{-498}{T}\right)}} \quad (III.9)$$

- **Polarisation ohmique :**

Les pertes ohmiques sont dues à la résistance que rencontre le flux d'ions en traversant la Membrane et à la résistance que rencontrent les électrons dans les électrodes et le circuit électrique. La membrane et les électrodes obéissant à la loi d'Ohm, on peut exprimer les pertes ohmiques par l'équation suivante:

$$V_{ohm} = I_{stack} \cdot (R_m + R_c) \quad (III.10)$$

Avec :

R_c : est la résistance protonique de la membrane.

R_m : est la résistance équivalente de la membrane pour le flux d'ions, elle est calculée par la relation :

$$R_m = \frac{\rho_M l}{A} \quad (III.11)$$

Où :

ρ_M : est la résistivité spécifique de la membrane pour le flux d'électron.

A : est la surface active de la pile en (cm^2).

l : est la largeur de la membrane en (cm).

I_{stack} : est le courant de fonction de la pile.

Dans ce travail on a considéré que la membrane est en Nafion. [55],[53]

$$\rho = \frac{181,6 \cdot [1 + 0,03 \left(\frac{I_{stack}}{A}\right) + 0,062 \left(\frac{T}{303}\right)^2 \cdot \left(\frac{I_{stack}}{A}\right) \cdot \left(\frac{I_{stack}}{A}\right)^{2,5}]}{\left[\Psi - 0,643 - 3 \left(\frac{I_{stack}}{A}\right)\right] \exp\left[4,18 \frac{T-303}{T}\right]} \quad (III.12)$$

Avec :

Ψ : Fraction de l'aire ouverte d'une plaque perforée .

• **Polarisation de concentration (Mass Transport):**

La polarisation de concentration est donnée par la relation suivante:

$$V_{\text{conc}} = -B \cdot \ln\left(1 - \frac{J}{J_{\text{max}}}\right) \quad (\text{III.13})$$

Avec :

J : la densité de courant (A/cm^2)

J_{max} : La densité de courant maximale (A/cm^2)

B : Désigne la constante électrochimie (V) et donné par la relation suivant. [53]

$$B = \frac{RT}{nF} \quad (\text{III.14})$$

Avec :

R : est la constante universelle des gaz ($8.314\text{J}/\text{K} \cdot \text{mol}$)

T : est la température (K)

n : Nombre des cellules élémentaires de la pile

F : Le constant de Faraday ($96.487\text{C}/\text{K} \cdot \text{mol}$)

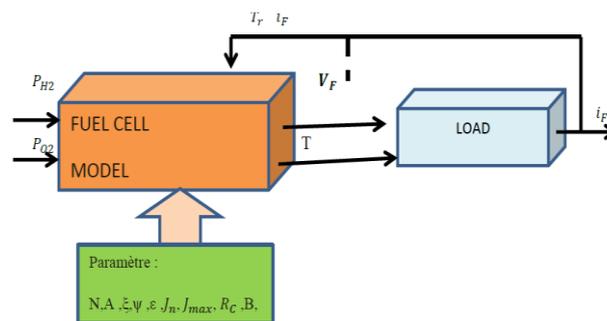


Figure (III.2): Modèle statique simplifié de la pile à combustible (PEMFC) [56]

III.2.2. Calcul des pressions partielles

III.2.2.1. Les hypothèses du modèle de calcul des pressions partielles

Quelques suppositions ont été faites à la construction du modèle :

- les gaz sont idéaux
- les canaux qui transportent les gaz le long d'électrodes ont un volume fixe mais leur longueur est petite. Cela nous permet de considérer une seule valeur de la pression à l'intérieur d'un canal ;
- La sortie d'un canal se fait via un seul orifice. Le rapport entre les pressions à l'intérieur et à l'extérieur du canal est assez grand pour pouvoir considérer l'orifice comme étouffé ;
- la température est stable tout le temps.

III.2.2.2. Calcul de la pression partielle d'hydrogène

Pour calculer les pressions partielles, chaque gaz individuel a été considéré séparément et l'équation des gaz idéaux a été appliquée pour chacun. On donne ici l'exemple d'hydrogène [57].

$$P_{H_2} \cdot V_{an} = n_{H_2} \cdot RT \quad (III.15)$$

Avec :

V_{an} : est le volume de l'anode.

n_{H_2} : est le nombre d'atome d'hydrogène dans le canal de l'anode.

R : est la constante universelle des gaz [l.atm/Kmol.K].

T : est la température absolue (K).

En isolant la pression et en appliquant la dérivé à l'expression précédente on obtient :

$$\frac{d}{dt} P_{H_2} = \frac{RT}{V_{an}} q_{H_2} \quad (III.16)$$

Avec :

P_{H_2} : est la dérivé de n_{H_2} et représente le débit molaire de l'hydrogène [Kmol/s].

Il y a trois contributions pertinentes au débit molaire de l'hydrogène :

- Le débit injecté à l'entrée de la pile $q_{H_2}^{in}$
- Le débit de combustible qui participe à la réaction chimique $q_{H_2}^r$
- Le débit du combustible qui sort de la pile $q_{H_2}^{out}$

$$q_{H_2} = q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^{out} - q_{H_2}^r \quad (III.17)$$

Ainsi :

$$\frac{d}{dt} P_{H_2} = \frac{RT}{V_{an}} (q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^{out} - q_{H_2}^r) \quad (III.18)$$

Selon les relations de l'électrochimie, le débit de l'hydrogène qui participe à la réaction peut être calculé en fonction du courant traversant le 'stack' : I_{stack}

$$q_{H_2}^r = \frac{NOI_{stack}}{2F} = 2K_r \cdot I_{stack} \quad (III.19)$$

Avec :

K_r : est une constante définie afin de simplifier le modèle [Kmol/s.A].

En revenant au calcul de la pression partielle d'hydrogène, il est possible d'écrire [58]

$$\frac{d}{dt} P_{H_2} = \frac{RT}{V_{an}} (q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^{out} - 2K_r \cdot I_{stack}) \quad (III.20)$$

On doit exprimer le débit molaire d'hydrogène qui sort de l'anode $q_{H_2}^{out}$ en fonction de sa pression à l'intérieur de l'électrode P_{H_2}

Pour cela, on prend le cas général d'un orifice, considéré étouffé, alimenté avec une mixture de gaz ayant la masse molaire moyenne M [Kg/Kmol] (figure III.3).

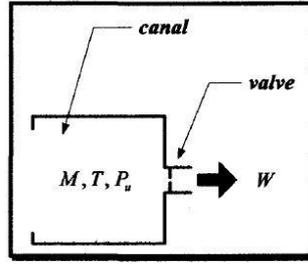


Figure.(III.3): Illustration d'un orifice [59]

Cet orifice (valve) présente la caractéristique suivante pour une certaine valeur de la Température T:

$$\frac{W}{P_u} = K\sqrt{M} \quad (\text{III.21})$$

Avec :

W : est le débit de masse [Kg/s].

K : la constante de la valve qui dépend principalement de la surface -d'orifice $[\frac{\sqrt{\text{Kmol.Kg}}}{\text{atm.s}}]$.

P_u : est la pression à l'intérieur du canal [atm].

M : la masse molaire moyenne [Kg/Kmol].

On peut donc, exprimer le débit molaire d'hydrogène qui sort de l'anode $q_{\text{H}_2}^{\text{out}}$ en fonction de la pression à l'intérieur d'électrode P_{H_2} par la relation:

$$q_{\text{H}_2}^{\text{out}} = K_{\text{H}_2} \cdot P_{\text{H}_2} \quad (\text{III.22})$$

La relation (III.20) devient

$$\frac{d}{dt}(P_{\text{H}_2}) = \frac{RT}{V_{\text{an}}}(q_{\text{H}_2}^{\text{in}} - K_{\text{H}_2} \cdot P_{\text{H}_2} - 2K_r \cdot I_{\text{stack}}) \quad (\text{III.23})$$

Ce qui donne :

$$\frac{d}{dt}(P_{\text{H}_2}) + \frac{RT \cdot K_{\text{H}_2}}{V_{\text{an}}} P_{\text{H}_2} = \frac{RT}{V_{\text{an}}}(q_{\text{H}_2}^{\text{in}} - 2K_r \cdot I_{\text{stack}}) \quad (\text{III.24})$$

En appliquant la transformée de Laplace à l'équation (III.24) on obtient:

$$P_{\text{H}_2} = \frac{1/K_{\text{H}_2}}{1+(V_{\text{an}}/RT \cdot K_{\text{H}_2})s} P_{\text{H}_2} = (q_{\text{H}_2}^{\text{in}} - 2K_r \cdot I_{\text{stack}}) \quad (\text{III.25})$$

En posant :

$$\tau_{\text{H}_2} = \frac{V_{\text{an}}}{RT \cdot K_{\text{H}_2}} \text{ il vient :} \quad (\text{III.26})$$

$$P_{\text{H}_2} = \frac{1/K_{\text{H}_2}}{1+\tau_{\text{H}_2} s} (q_{\text{H}_2}^{\text{in}} - 2K_r \cdot I_{\text{stack}}) \quad (\text{III.27})$$

Une opération similaire est faite pour l'oxygène, on a obtient:

$$\tau_{\text{O}_2} = \frac{V_{\text{an}}}{RT \cdot K_{\text{O}_2}} \quad (\text{III.28})$$

$$P_{\text{O}_2} = \frac{1/K_{\text{O}_2}}{1+\tau_{\text{O}_2} s} (q_{\text{O}_2}^{\text{in}} - 2K_r \cdot I_{\text{stack}}) \quad (\text{III.29})$$

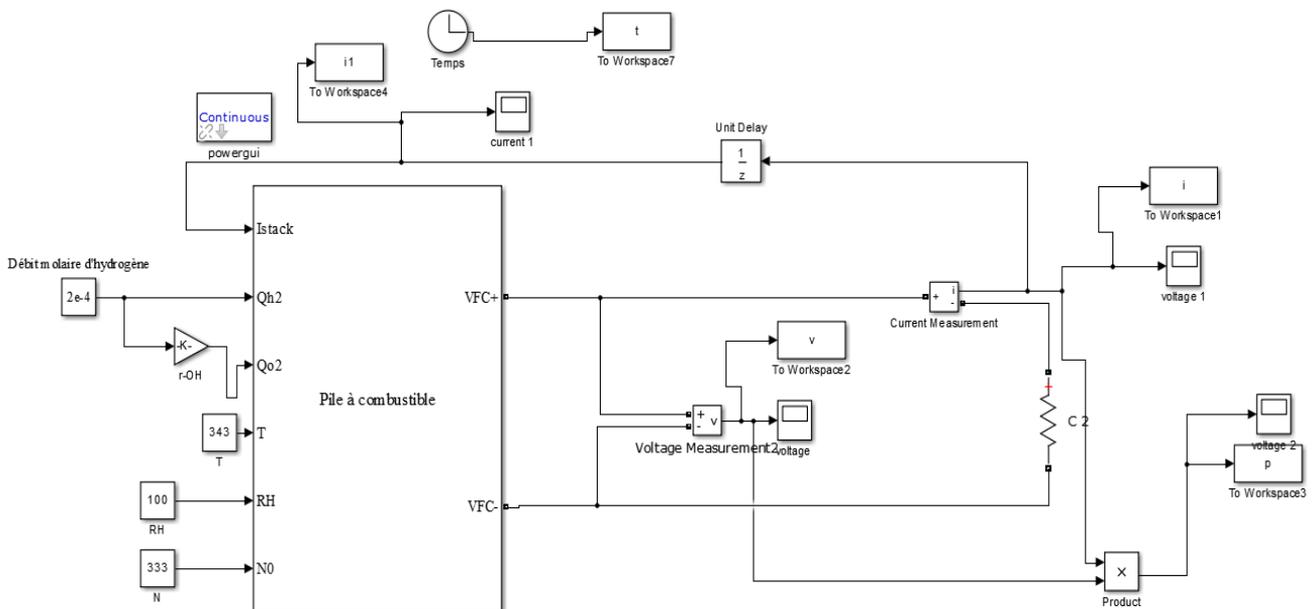
III.3. Résultats de la simulation du PEMFC

Les résultats de la simulation obtenue sont réalisés sous l'environnement du logiciel Matlab/Simulink avec les paramètres physiques donnés dans le Tableau (III.1).

| Paramètres | Valeurs | Paramètres | Valeurs |
|---------------|--------------------------------|------------|--|
| F | 9684600 C/Kmol | K_{H_2O} | $1/7.716 * 10^{-6}$ Kmole/(s.atm) |
| R | 8314.47 J/Kmol.K | T | 343 |
| K_{H_2} | $4.22 * 10^{-5}$ Kmole/(s.atm) | ξ_1 | -0.948 |
| τ_{H_2} | 3.37 (s) | ξ_2 | $0.00286 + 0.0002 \cdot \ln A$ $+ (4.3.105) \ln CH_2$ |
| K_{O_2} | $2.11 * 10^{-5}$ Kmole/(s.atm) | ξ_3 | $7.6 * 10^{-5}$ |
| τ_{O_2} | 6.74 (s) | ξ_4 | $-1.93 * 10^{-4}$ |
| τ_{H_2O} | 18.418 (s) | Ψ | 23 |
| A | 333 cm^2 | U | 448 V |
| P | 4 KW | I | 8.92 A |
| J_{\max} | 1500 mA/ cm^2 | J | 1.2 mA/ cm^2 |
| N | 582 | | |

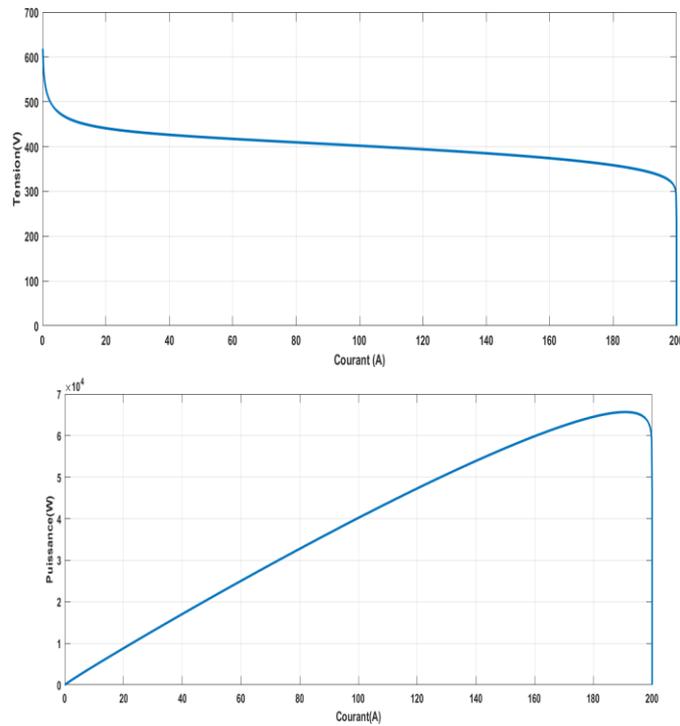
Tableau (III.1): Paramètres du modèle [60], [61], [62], [63]

III.3.1. Caractéristique Tension/ Courant et Puissance

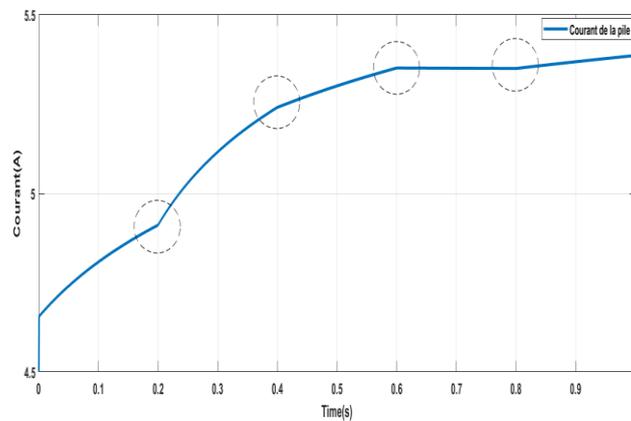


Figure(III.4). Simulation d'une pile à combustible PEMFC.

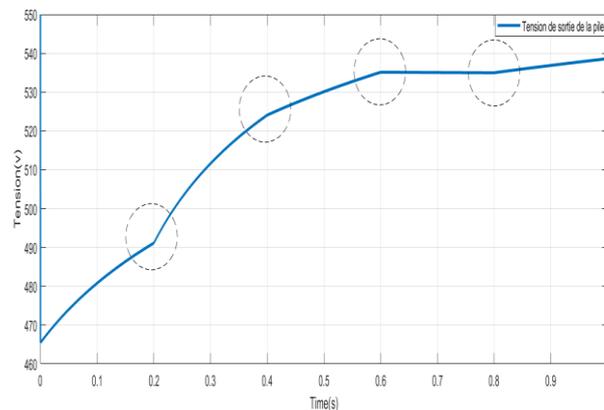
Cette simulation représenté la pile à combustible PEMFC, Les entrées I_{stack} et débit de hydrogène et oxygène et température et nombre de cellule et le sortie tension de pile , et I_{stack} reliée entre la charge et le débit de deux par un retour discrète.



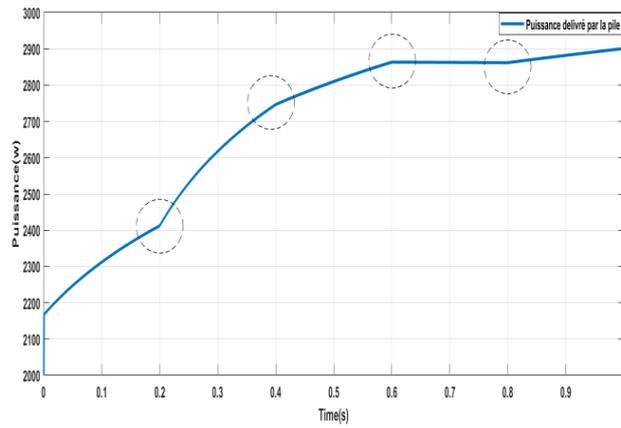
Figure(III.5). Caractéristique V(I) et P(I)



Figure(III.6). Caractéristique I(t)

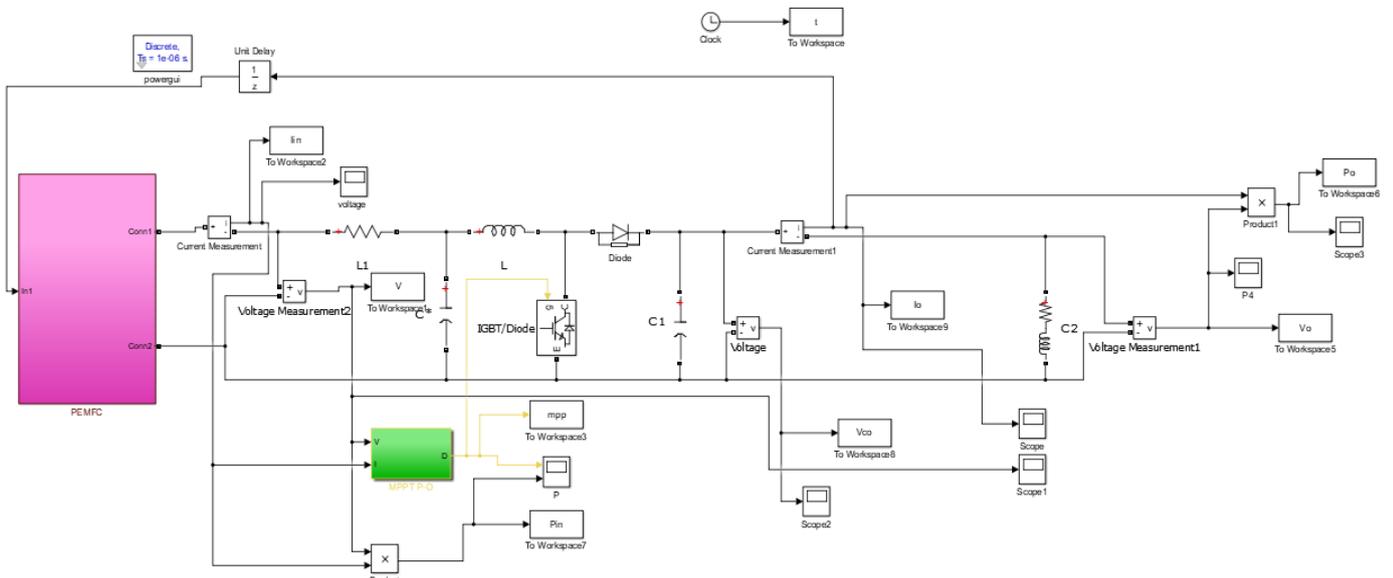


Figure(III.7). Caractéristique V(t)

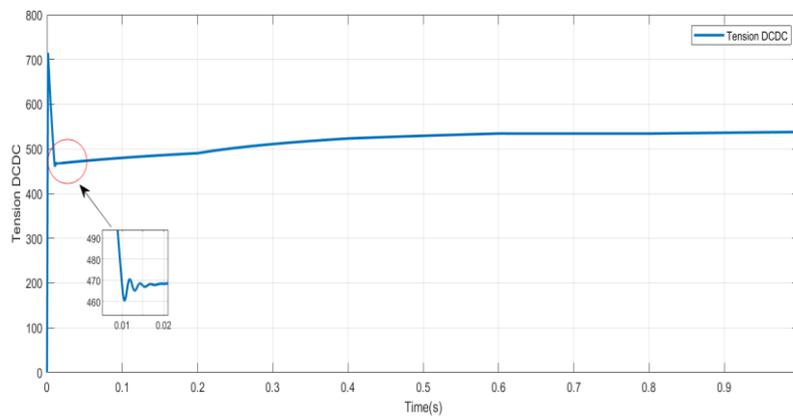


Figure(III.8). Caractéristique P(t)

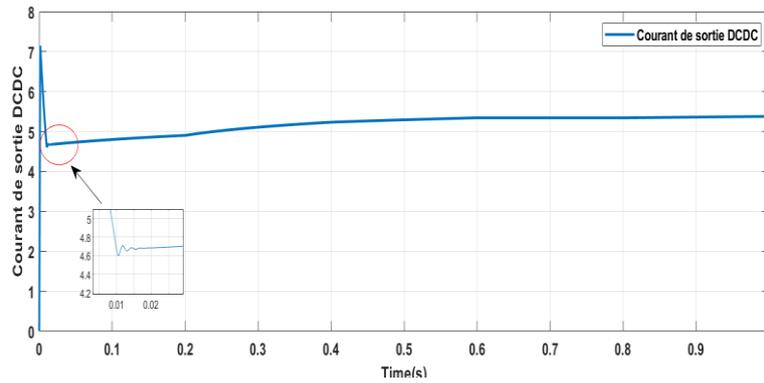
III.3.2.résultats de simulation du PEMFC par command MPPT



Figure(III.9). Simulation d'une pile à combustible par command MPPT



Figure(III.10) : Tension de pile par command MPPT.



Figure(III.11): courant de pile par command MPPT.

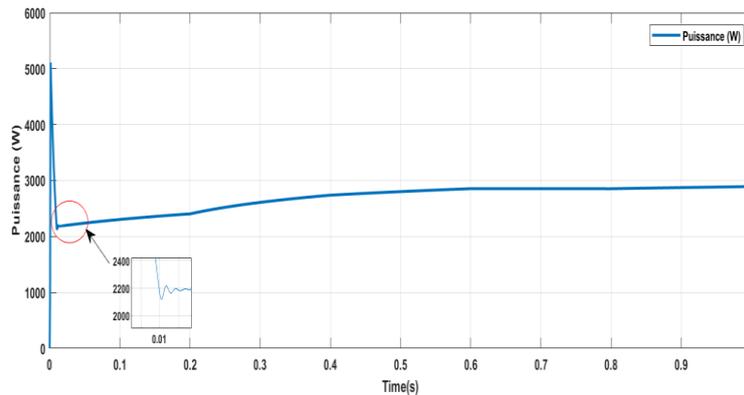
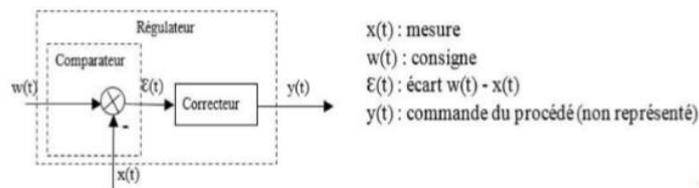


Figure (III.12) : puissance de pile par command MPPT.

D’après les résultats des simulation sans ,figure(III.5), et avec commande MPPT ,figure(III.9) , on peut voir la différence concernant le temps de réponse et le temps pour avoir la puissance maximale pour le courant demandé par la charge . D’après ces resultas , il est claire que la commande MPPT fait extraire la puissance maximale du PAC en gardant un temps de réponse et disponibilité de puissance demandé.

III.4. Les Régulateurs Classiques

Dans les études des systèmes asservis c’est la fonction mathématique du régulateur qui est utile, c’est-à-dire la connaissance de sa fonction de transfert. Un régulateur est composé d’un élément, qui effectue la différence entre la mesure et la consigne, appelé comparateur ou soustracteur et d’un correcteur (Figure III.13). Le correcteur élabore une valeur de sortie en fonction de l’écart constaté par le comparateur afin de corriger l’évolution de la grandeur à maîtriser du procédé. La fonction de transfert du correcteur est notée $C(p)$ [64].

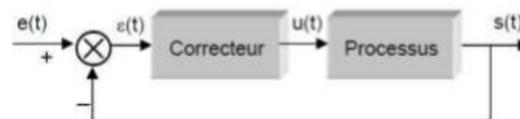


Figure(III.13).Composition de la fonction du régulateur [65].

La commande appliquée au système doit être limitée (notamment en amplitude) afin d'éviter un mauvais fonctionnement : au mieux l'actionneur sature et la commande appliquée au système est maximale (dans ce cas, il y a plus de régulation), au pire on risque de détruire l'actionneur ou le système.

Ces qualités s'évaluent en général en appliquant au système une entrée en forme d'échelon. On verra dans la pratique que ces exigences de performances ne peuvent être satisfaites de manière idéale. On adoptera alors un compromis en fonction des priorités du cahier des charges. L'objectif est que la variable commandée, représentée par la sortie $s(t)$, ait un comportement désiré sur un intervalle de temps donné. Il s'agit alors de déterminer le signal de commande $u(t)$ qui, dans cet intervalle, garantisse la sortie $s(t)$ désirée.

On peut réaliser la compensation en insérant, dans une chaîne, un correcteur directement en cascade avec les autres éléments.



Figure(III.14). Correcteur directement en cascade avec les autres éléments [66].

La loi qui permet l'élaboration du signal de commande dépend de la structure interne du correcteur, c'est-à-dire de sa fonction de transfert. L'algorithme, ou loi de commande, du régulateur le plus classique est l'association des trois actions élémentaires des PID (Proportionnelle, Intégrale et Dérivée) : c'est le régulateur PID.

III.4.1.Régulateurs classiques de base

Un régulateur est un correcteur est un algorithme de calcul qui délivre un signal de commande à partir de la différence entre la consigne et la mesure. Les correcteurs industriels les plus utilisés peuvent être classés, selon leurs actions de correction, de la manière suivante [67] :

- ✓ Correcteur à action proportionnelle (P),

- ✓ Correcteur à action intégrale (I),
- ✓ Correcteur à actions proportionnelle et intégrale (PI),
- ✓ Correcteur à action dérivée (D),
- ✓ Correcteur à actions proportionnelle et dérivée (PD),
- ✓ Correcteur à actions proportionnelle, intégrale et dérivée (PID).

A. Correcteur à Action Proportionnelle (P)

➤ **Principe** : Le correcteur à action proportionnelle, est le correcteur le plus simple, puisque défini par un simple gain K.

La relation entre la sortie du correcteur (ou signal de commande) $u(t)$ et le signal d'entrée du correcteur (signal d'erreur) $\varepsilon(t)$ est :

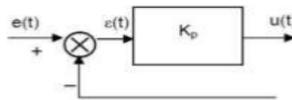
$$u(t) = k_p \cdot \varepsilon(t) \quad (\text{III.30})$$

La fonction de transfert est :

$$C(p) = \frac{u(p)}{\varepsilon(p)} k_p \quad (\text{III.31})$$

Où k_p : gain proportionnel.

Quelques soient le mécanisme et la source d'énergie utilisés, le correcteur proportionnel est essentiellement un amplificateur à gain variable. Son schéma fonctionnel est celui de la figure suivante :



Figure(III.15).Correction à actions proportionnelle [67].



Figure (III.16). la réponse indicielle du correcteur P et Entrée et sortie du correcteur P [68].

- **Effet**: L'action proportionnelle P crée un signal de commande $u(t)$ proportionnel au signal d'erreur $\varepsilon(t)$. Elle agit donc principalement sur le gain du système asservi et permet d'améliorer notablement la précision.
- **L'action proportionnelle** :
Entraîne une augmentation du gain, d'où une diminution de l'erreur statique (amélioration de la précision) , mais

- Augmente la bande passante du système, ce qui
- Améliore la rapidité du système et,
- Augmente l'instabilité du système.

Le correcteur proportionnel P n'est généralement pas utilisé seul ; tout correcteur possède au moins l'action proportionnelle.

On constate que l'augmentation de k_i entraîne :

- une amélioration de l'erreur statique,
- une décroissance du temps de montée,
- une faible amélioration du temps d'établissement,
- mais également une diminution de la marge de phase et une augmentation du dépassement (augmentation de l'instabilité du système).

B. Régulateur à Action Intégrale (I)

➤ **Principe** : La relation entre la sortie $u(t)$ et le signal d'erreur $\varepsilon(t)$ est :

$$\frac{du(t)}{dt} = k_i \cdot \varepsilon(t) \quad (\text{III.32})$$

$$u(t) = k_i \int_0^t \varepsilon(t) dt \quad (\text{III.33})$$

La fonction de transfert est :

$$C(p) = \frac{u(p)}{\varepsilon(p)} = \frac{k_i}{p} = \frac{1}{T_i p} \quad (\text{III.34})$$

K_i : gain intégral et T_i : constante de temps d'intégration. Son schéma fonctionnel est celui de la figure suivante

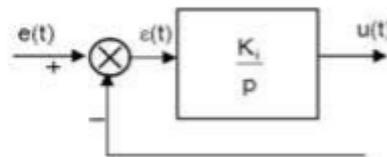
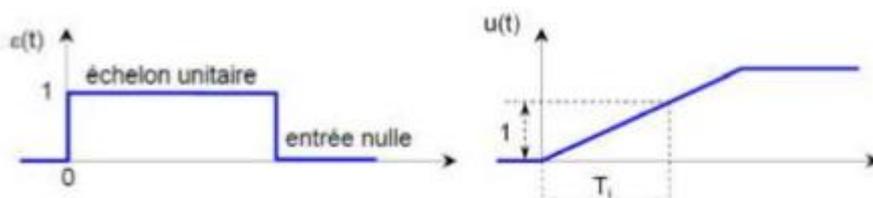


Figure (III.17). Correction à actions intégrale.



Figure(III.18). La figure ci dessus donne la réponse indicielle correcteur Intégrale [69].

➤ **Effet** : L'intérêt principal de ce correcteur est d'ajouter dans la chaîne de commande une intégration. Nous savons que la présence d'une intégration dans la FTBO augmente la classe du système et réduit ou annule, selon le type d'entrée, l'erreur statique du système.

L'action intégrale pure :

- Améliore la précision en réduisant ou annulant l'erreur statique, mais Introduit un déphasage de -90° qui risque de déstabiliser le système (diminution de la marge de phase).
- Le correcteur à action exclusivement Intégrale n'est pratiquement jamais utilisé, en raison de sa lenteur et de son effet déstabilisant. Il est, en général, associé au correcteur Proportionnel .

B.Régulateur à Action Dérivée (D)

➤ **Principe** : La relation entre la sortie $u(t)$ et le signal d'erreur $\varepsilon(t)$ est :

$$u(t) = \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \cdot k_d \tag{III.35}$$

La fonction de transfert est :

$$C(p) = \frac{u(p)}{\varepsilon(p)} \cdot k_d \cdot p = T_d \cdot p \tag{III.36}$$

K : gain dérivé, T_d : Constante de temps de dérivation.

Son schéma fonctionnel est celui de la figure suivante :

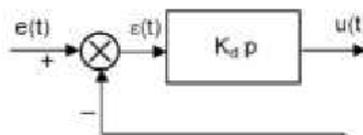


Figure (III.19).Correction à actions dérivée [70].

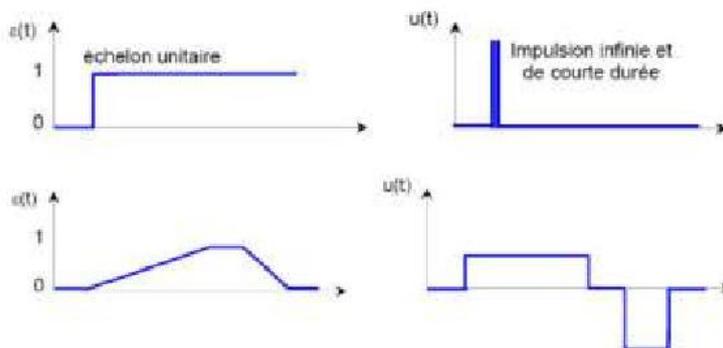


Figure (III.20).Réponses à un échelon et à une rampe du correcteur D. Entrée et sortie du correcteur à action dérivée (D) [70].

➤ **Effet** : La réponse indicielle montre qu'un correcteur à action exclusivement dérivée ne permet pas la transmission d'un signal L'action dérivée ne peut donc être utilisée seule. On fait appel à elle lorsque le signal de commande u doit être particulièrement efficace. En effet, ce correcteur permet de faire intervenir la dérivée du signal d'erreur; il sera d'autant plus actif que la variation de $\varepsilon(t)$ est rapide.

L'action dérivée pure :

- améliore la stabilité du système par l'introduction d'un déphasage supplémentaire de $+ 90^\circ$ (augmentation de la marge de phase),
- mais fait diminuer la précision du système,
- et amplifie les bruits de hautes fréquences.

Le correcteur à action exclusivement dérivée n'est pratiquement jamais utilisé, il est en général associé au correcteur Proportionnel .

D. Régulateur à Actions Proportionnelle, Intégrale et Dérivée (PID)

➤ **Principe** : Le correcteur PID combine les actions des 3 correcteurs P, I et D [71].

La relation entre la sortie $u(t)$ et le signal d'erreur $\varepsilon(t)$ est :

$$u(t) = k_p \cdot \varepsilon(t) + k_i \cdot \int_0^t \varepsilon(t) dt + \frac{d\varepsilon}{dt} \cdot k_d \quad (\text{III.37})$$

La fonction de transfert est :

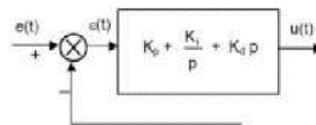
$$C(p) = \frac{u(p)}{\varepsilon(p)} = k_p + \frac{k_i}{p} + k_d \cdot p = k_p \left(1 + \frac{k_i}{k_p} \cdot \frac{1}{p} + \frac{k_d}{k_p} p \right) = k_p \left(1 + T_d \cdot p + \frac{1}{T_i p} \right) \quad (\text{III.38})$$

k : gain proportionnel. k_i : gain intégral. k_d : gain dérivé,

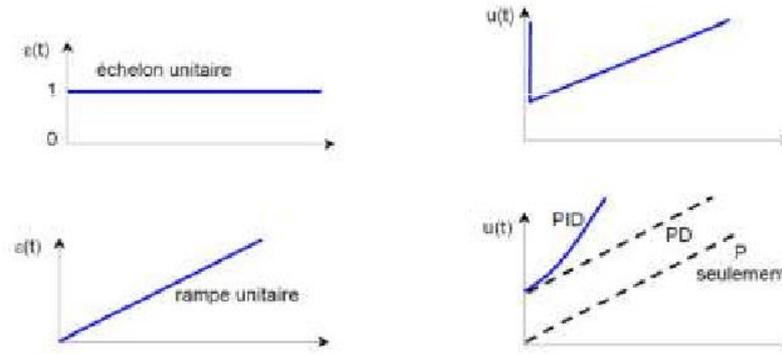
$T_d = k_d/k_p$: constante de temps de dérivation.

$T_i = k_p/k_i$: constante de temps d'intégration.

Son schéma fonctionnel est celui de la figure suivante



Figure(III.21).Correction à actions proportionnelle, intégrale et dérivée (PID) [72].



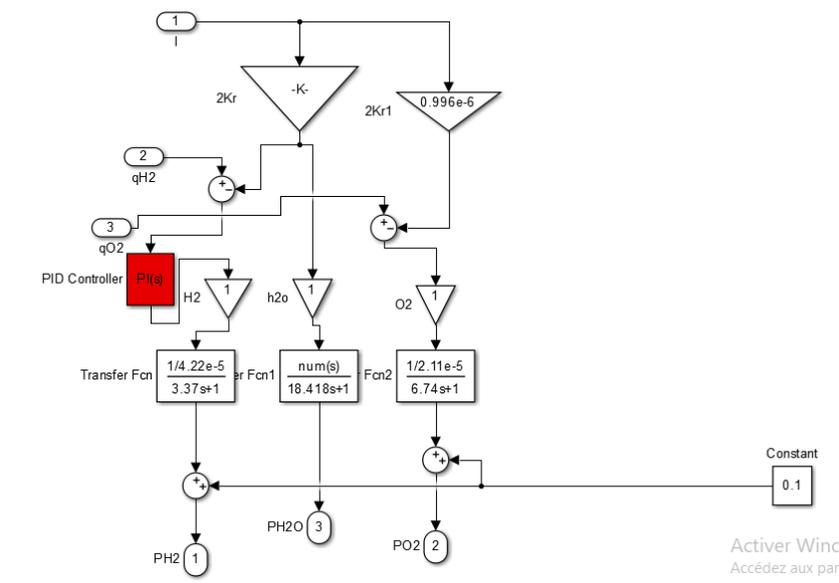
Figure(III.22). Réponses indicelle : Entrée et sortie du correcteur à actions proportionnelle, intégrale et dérivée [72].

➤ **Effet :** Les effets de chaque correcteur (K_p , K_i et K_d) sur la réponse en boucle fermée du système sont regroupés sur le tableau III.2 :

| | Temps de montée | Déplacement | Temps d'établissement | Erreur statique |
|----------------|--------------------|-------------|-----------------------|--------------------|
| Si K_p croit | Diminue | Augmente | Peu de changements | Augmente |
| Si K_i croit | Diminue | Augmente | Augmente | Éliminée |
| Si K_d croit | Peu de changements | Diminue | Diminue | Peu de changements |

Tableau (III.2): Effets des correcteurs P, I, et D sur les régimes statique et dynamique du système en boucle fermée [73].

III.5. Control de la PEMFC avec le régulateur PI



Figure(III.23). Simulation d'un pile à combustible avec PI

III .5.1.résultat de simulation de la pile PEMFC avec PI

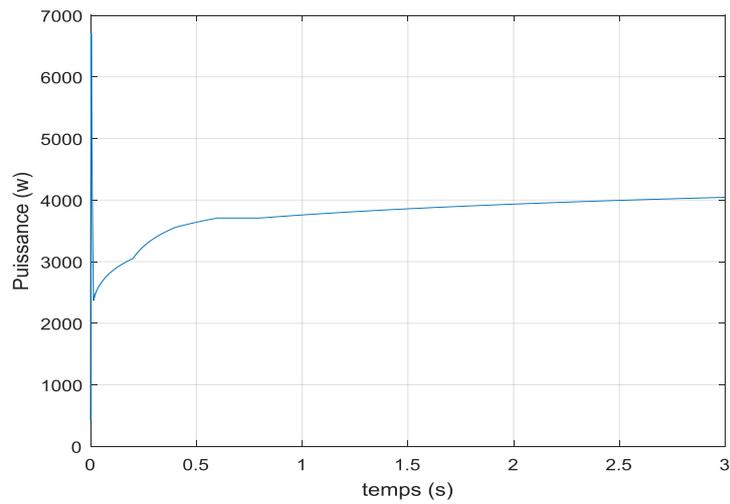
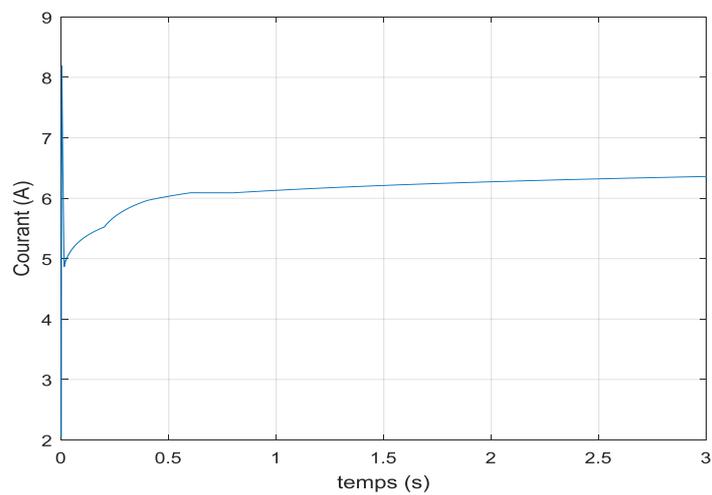
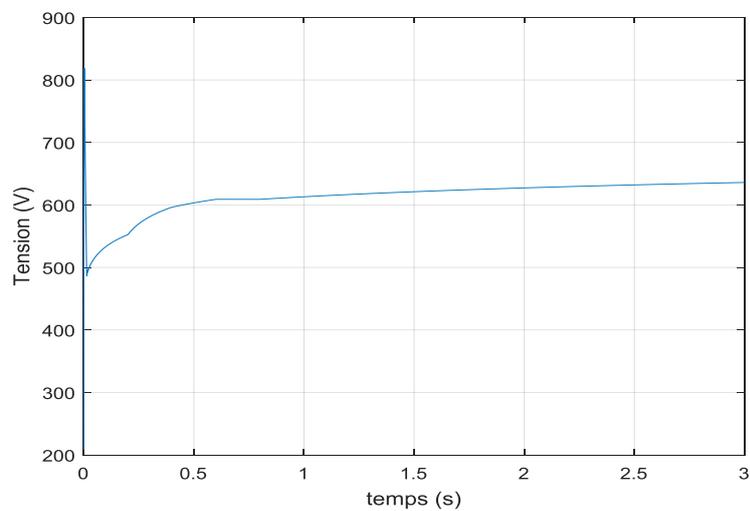


Figure.(III.24): Caractéristique P(t)



Figure(III.25) : Caractéristique I(t)



Figure(III.26):Caractéristique V(t)

III.6.Conclusion

Les résultats obtenus des modèles utilisées de la littérature et le contrôle par un régulateur classique PI qui corrige le débit d'hydrogène ont été intéressants dans la forme et la variation de l'amplitude en les comparant à d'autres résultats déjà publiés. De même ces résultats permettent de comprendre les performances de la pile à travers l'influence de la température, la pression, le débit d'hydrogène et d'oxygène et la surface des électrodes et de la membrane forment les éléments les plus pertinents sur la performance de la pile PEMFC.



**Chapitre IV : Simulation et Résultats
du Système**

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre c'est présenté les résultats de simulation de toute la chaine du système hybride PV-H₂-PAC. Afin de trouver une configuration énergétique optimale, une commande MPPT par algorithme classique PO est introduite dans le PV et la pile d'une part et une commande par régulateur PI pour le contrôle du débit d'hydrogène pour une recherche optimale de la puissance électrique générée par la pile à combustible.

IV.2 Simulation du système hybride PV-H₂-PAC

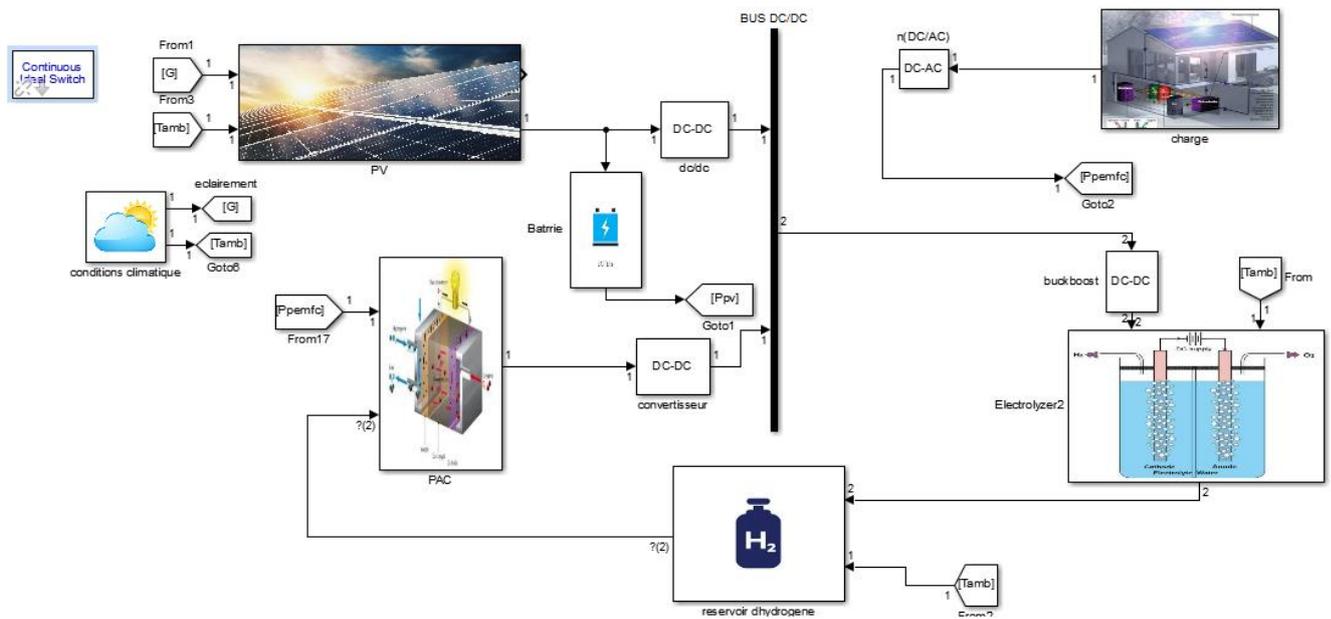


Figure (IV.1): Simulation du système hybride PV-H₂-PAC

IV.3. Résultats de simulation du partie PV

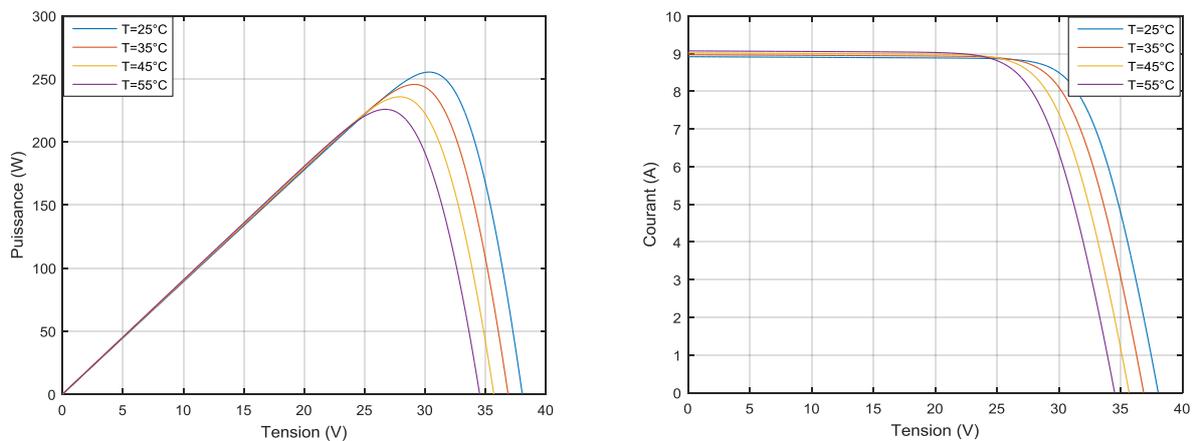


Figure (IV.2) : Influence de la température sur la caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$, $I_{pv} = f(V_{pv})$

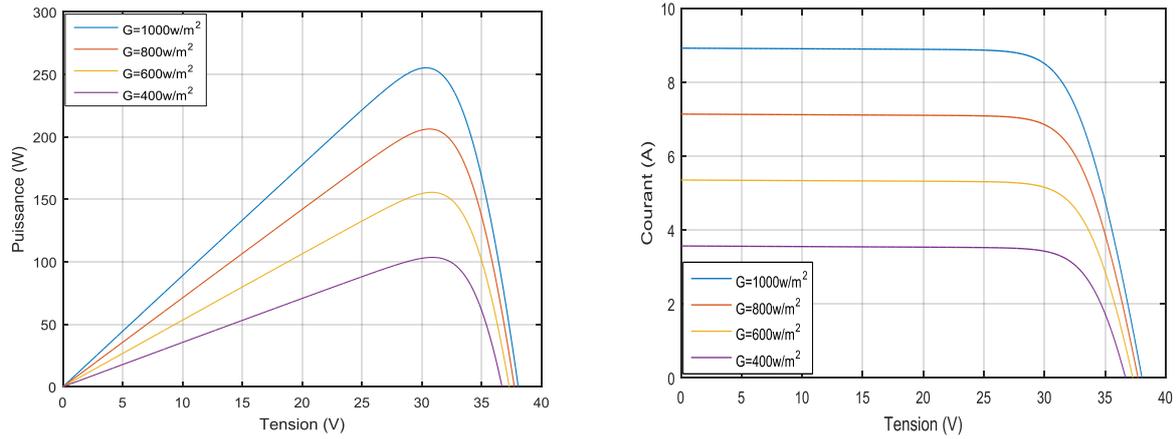


Figure (IV.3) : Influence de l'irradiation solaire sur les caractéristiques du PV $P_{pv}=f(V_{pv})$, $I_{pv} = f(V_{pv})$

IV.3.1. Résultats de simulation partie PV avec MPPT

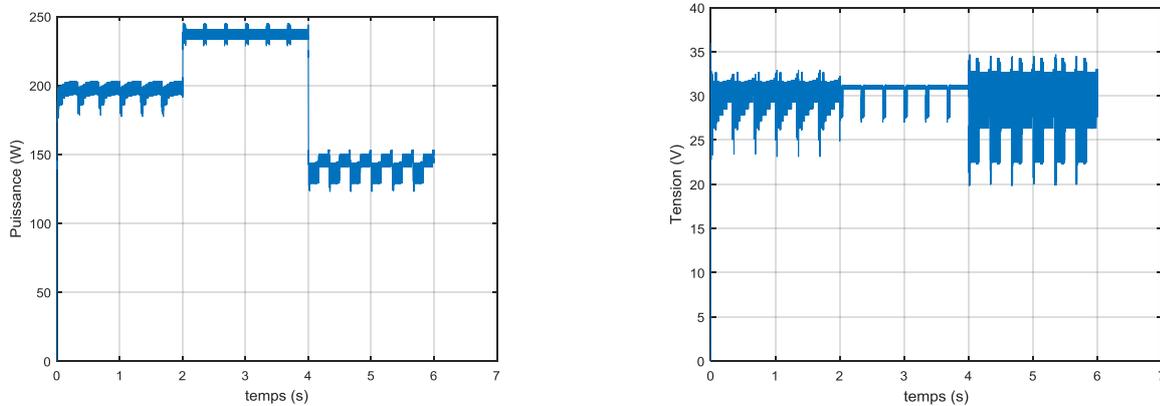


Figure (IV.4) : Effet de la commande MPPT sur la puissance du panneau PV

Figure (IV.5) : Effet de la commande MPPT sur la tension du panneau PV

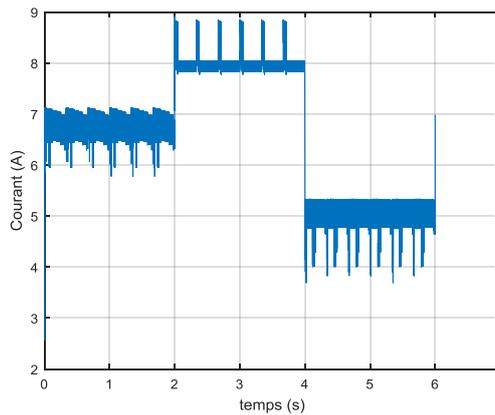


Figure (IV.6) : Effet de la commande MPPT sur le courant du panneau PV

La simulation du PV avec MPPT /PO impliquée a donné des résultats typiques de la puissance maximale signalée par le constructeur dans les conditions standards $W_c=250$ W avec un point de fonctionnement tension -courant très signifiante (30V, 8,30A)

IV.4. Résultats de simulation partie électrolyseur

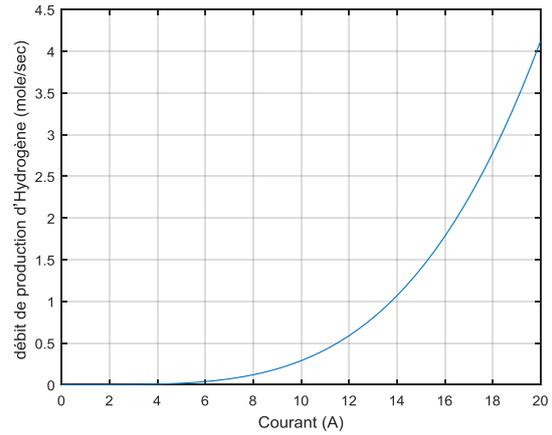
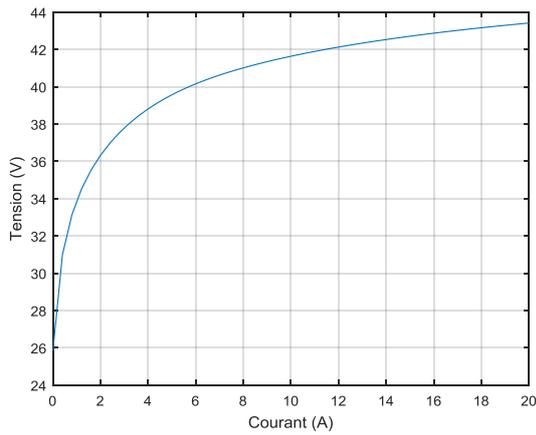


Figure (IV.7): Caractéristique V-I d'électrolyseur

Figure (IV.8): Caractéristique variation du débit du H2 produit par l'électrolyseur avec le courant entrant nH2(I)

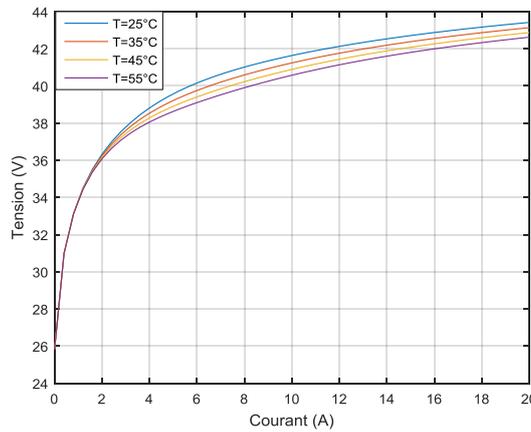


Figure (IV.9): influence de la température sur la caractéristique I-V de l'électrolyseur

Analyse de résultat : Pour l'électrolyseur l'arrivée de la puissance à partir de la source est suffisante pour l'opération de séparation de l'hydrogène de sa molécule d'eau avec un débit variable d'une manière ascendante en fonction du courant

IV.5. Résultats de simulation partie PEMFC

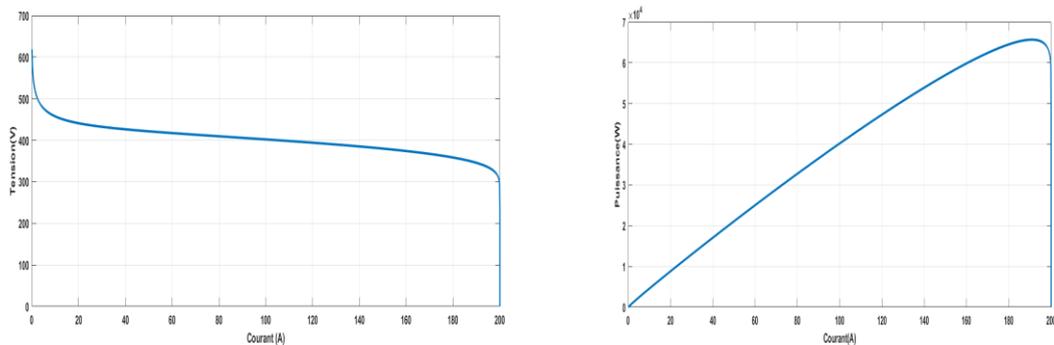


Figure (IV.10). Caractéristique V(I) et P(I)

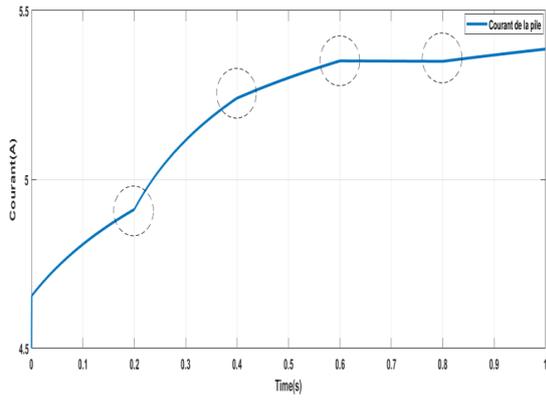


Figure (IV.11) : Caractéristique I(t),

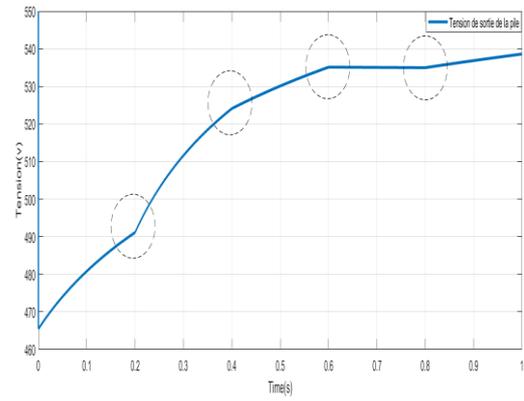


Figure (IV.12) : Caractéristique V(t)

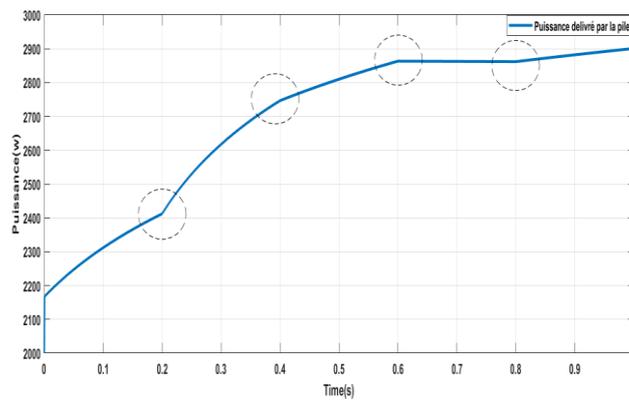


Figure (IV.13) : Caractéristique P(t)

IV.5.1. Résultats de simulation partie PEMFC avec commande MPPT

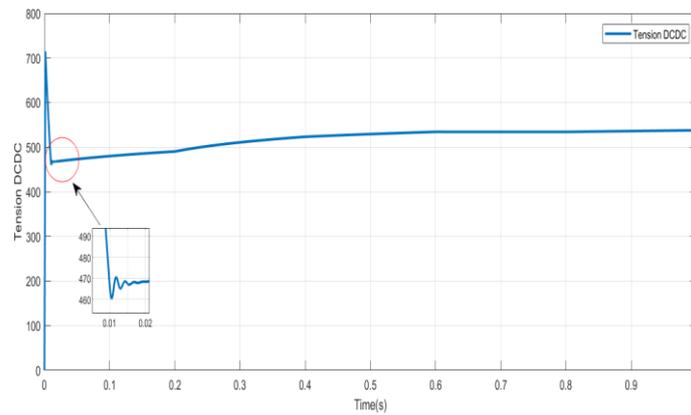


Figure (IV.14) : Tension de pile par command MPPT.

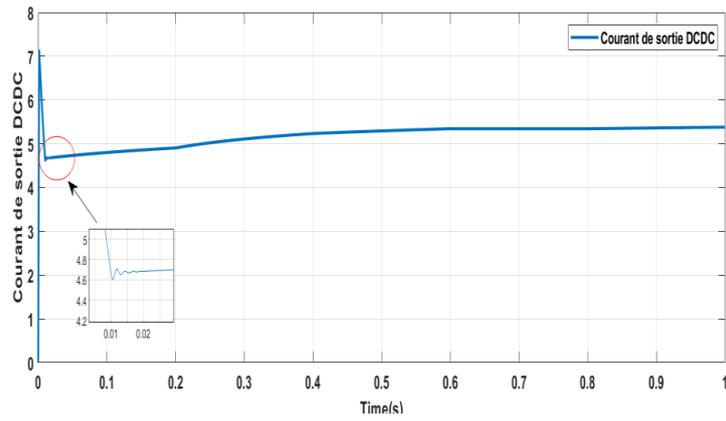


Figure (IV.15) : courant de pile par command MPPT.

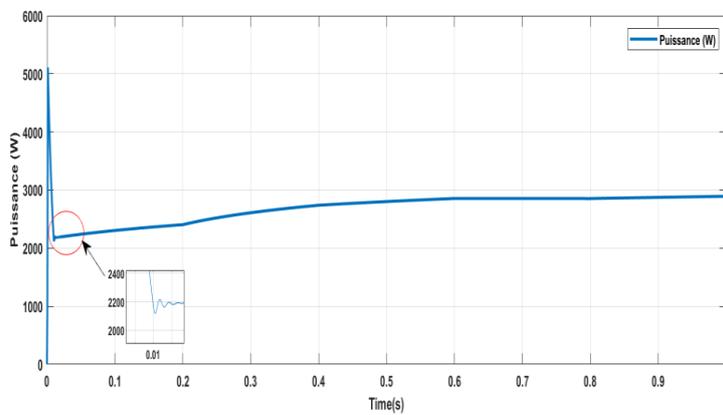
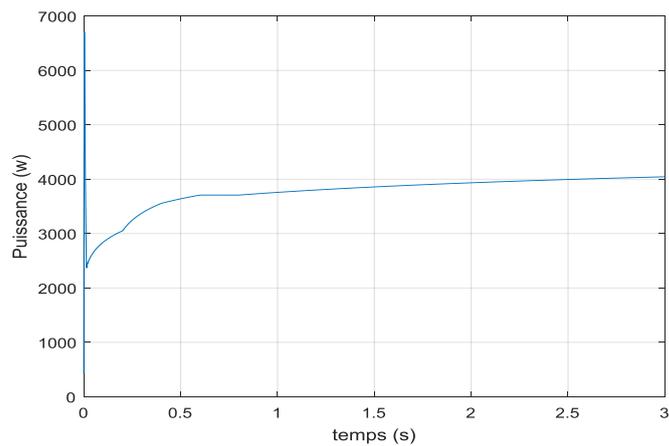


Figure (IV.16) : puissance de pile par command MPPT.

IV.5.2. Résultats de simulation partie avec commande PI



Figure(IV.17) : Caractéristique P(t)

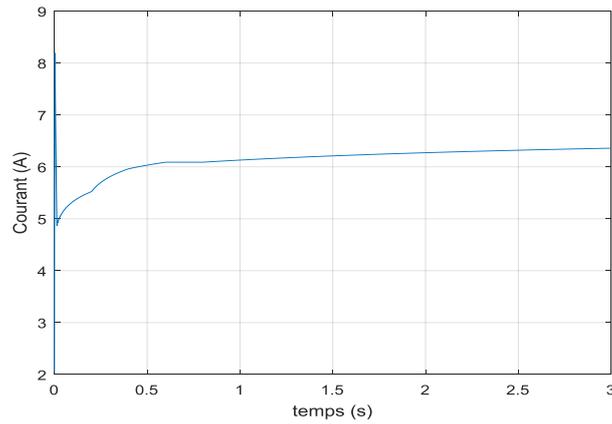


Figure (IV.18) : Caractéristique I(t)

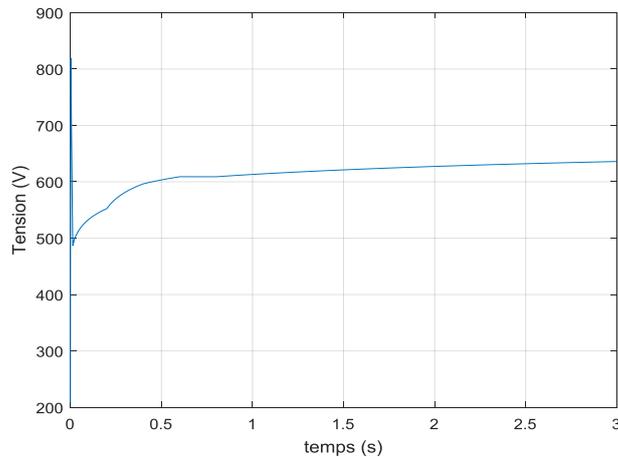


Figure (IV.19) : Caractéristique V(t)

Analyse des résultats : la réponse de la pile PEMFC était significative sur trois paliers où la puissance produite en fonction de l'hydrogène liée à son tour au courant était 2,91 KW loin de sa valeur nominale 4KW signalé au tableau caractéristique de la pile. Une amélioration modeste de la puissance produite par la pile égale à 3 kW après avoir introduit la commande MPPT par PO. L'intégration du contrôleur classique PI dans la commande de la pile à travers le débit d'hydrogène était influente nettement ou la puissance est grimée à côté de sa valeur maximale de 4 kW

IV.6. Conclusion :

Les résultats de simulation de toute la chaîne du système hybride PV-H₂-PAC Obtenus dans ce chapitre étaient acceptable comparativement à d'autres déjà publiés dans le but de trouver une configuration énergétique optimale, une commande MPPT par algorithme classique PO est introduite dans le PV et la pile d'une part et une commande par régulateur PI pour le contrôle du débit d'hydrogène pour une recherche optimale de la puissance électrique générée par la pile à combustible.

Conclusion générale

L'étude réalisée dans ce mémoire de master en Electrotechnique industrielle a examiné la faisabilité d'utiliser une pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) alimentée par de l'hydrogène vert produit par un électrolyseur alimenté par un panneau photovoltaïque. Les résultats obtenus ont révélé que la performance de la pile à combustible variait en fonction des différentes grandeurs mesurées, notamment le débit du carburant Hydrogène, la température, l'humidification de la membrane, la qualité des électrodes

L'utilisation d'un électrolyseur alimenté par un panneau photovoltaïque pour produire de l'hydrogène vert présente de nombreux avantages, notamment en termes de durabilité environnementale et de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Cependant, il est essentiel de noter que les performances de la pile à combustible dépendent de plusieurs facteurs, tels que la qualité de l'hydrogène produit, les conditions d'exploitation et la configuration de la pile elle-même.

Bien que les résultats obtenus n'étaient pas atteints les niveaux optimaux comme ça été souhaité par les techniques d'intelligence artificielle, ils représentent néanmoins un pas significatif vers l'utilisation efficace de l'hydrogène vert dans les piles à combustible PEMFC. Ces résultats fournissent des informations précieuses pour optimiser les performances de la pile à combustible, en mettant l'accent sur des domaines tels que l'efficacité énergétique, la stabilité à long terme et la durabilité globale du système.

La modélisation des différentes parties de notre système commençant par la source renouvelable du panneau photovoltaïque, vers la pile à hydrogène PEMFC en passant par la production de l'hydrogène par l'électrolyseur. L'élaboration des programmes de calcul, de contrôle et de simulation sous Matlab/Simulink des différents grandeurs qui traduisent le comportement de notre système sous différentes conditions du système PV/Electrolyseur/Pemfc et son contrôle avec un régulateur classique PI présente l'apport principale de notre contribution de ce travail de fin d'études. Les résultats obtenus étaient semblables à plusieurs travaux de la littérature déjà publiés en thèses, mémoires, livres et articles [3, 11, 25, 61] ce qui signifie une satisfaction aux démarches adoptées dans ce travail.

En conclusion, malgré les résultats acceptables obtenus dans cette étude, il reste encore beaucoup de travail à faire pour atteindre le plein potentiel des piles à combustible PEMFC alimentée par de l'hydrogène vert dont les applications sont multiples et prometteuse notamment dans la production de l'énergie électrique décentralisée et le secteur de transport urbain et maritime. Cependant, cette recherche jette les bases d'un avenir plus durable et économe en énergie, en encourageant la transition énergétique et des nouvelles perspectives pour les applications de l'hydrogène vert dans le secteur de l'énergie sans émission de carbone.

Références bibliographiques

- [1] SI R. Lin, Y. Weng, X. Un. ~Uld F. Xiong. " R;lpid cold stan of }Tolon elchange mellllbl"Jile fuel ccII, by lIe p-inled cin::uit board lcc.:hllology,"1111. J. H)dn,.-,' n El",,,,,). ,ot. 39. pp. Ig369 lg37g. DeL 20 14.
- [2] <http://www.cnrtl.fr/definition/hydrogene>. Octobre 2015.
- [3] G. Marbán et T. Valdés-Solís « Towards the hydrogen economy ? », *Int. J. Hydrogen Energy*, 32(2):1625–1637, 2007.
- [4] INERIS, jì Les techniques de production de l.hydrogene et les risques associes jí, rapport d.étude NjÆ DRA-08-95313-07833B, juin 2008 .
- [5] T.Alleau , « Pourquoi l'' hydrogène ? » *In Pollutec, Paris*, 30 novembre 2005.
- [6] <http://www.iea.org/textbase/papers/2006/hydrogen.pdf>. [Consulté en octobre 2015].
- [7] DE DIANOUS, Valérie, SYLVAINE, PIQUE, et WEINBERGER, « Etude comparative des réglementations, guides et normes concernant les électrolyseurs et le stockage d'hydrogène» RAPPORT D'ETUDE 15/03/2016.
- [8] J. K. Dahl, K. J. Buechler, A. W. Weimer, A. Lewandowski, C. Bingham, «Solar-thermal dissociation of methane in a fluid-wall aerosol flow reactor» *International Journal of Hydrogen Energy*, 29 (2004) 725-736.
- [9] R. Momirlan et T. Veziroglu, «Recent directions of world hydrogen production», *Ren. Sust. Energy Rev.* 3 (1999) 219, Doctorat de l'université de Toulouse Soutenu le 03 Octobre 2008.
- [10] G. Gondor , « Pour le stockage de l'hydrogène : Analyse thermodynamique de la formation d'hydrures métalliques et optimisation du remplissage d'un réservoir ». *Mechanics of materials*. Université de Franche-Comté, 2008.
- [11] <http://www.periodni.com/fr>. octobre 2015.
- [12] J.C. Crivello, « Contribution à l''étude des propriétés thermodynamiques et électroniques d hydrures de composés de Haucke ». Thèse de doctorat, Université Paris Sud - Paris XI, 2005.
- [13] A. Zuttel «Materials for hydrogen storage». *Master. Today*, 6:24–33, 2003.
- [14] D .Mori et K. Hirose « Recent challenges of hydrogen storage technologies for fuel cell vehicles ». In *Proceedings World Hydrogen Technologies Convention*, 2007.
- [15] N .LEMETA, L.THIAIS et L. BESANCON : *Projet SOLHY* « Analyse et développement d''une SOLution HYbride combinant les voies solide et gazeuse pour le stockage d''hydrogène». Action concertée énergie CNRS - Ministère de la Recherche, 2006.
- [16] http://www.ieahia.org/pdfs/Hydrogen_Gaps_and_Priorities.pdf. octobre 2015.
- [17] K.BOUZIANE « Etude d'une installation photovoltaïque de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau». Thèse de Magister en 2011
- [18] J.LABBÉ « l'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés », l'Ecole des Mines de Paris, décembre 2006.
- [19] www.fournisseur-energie.com
- [20] <http://www.airproducts.fr/Industries/Energy/Hydrogen-Energy/Power-Generation.aspx>
- [21] A.BOUNACEUR « Etude et conception d'un système hybride de production d'énergie ». Master Professionnel a Ouargla en 2015.
- [22] M.MAAMIR « Gestion d'énergie d'un système d'entraînement électrique hybride basé sur un moteur synchrone à aimants permanents ».Thèse Magister Option : Commande et motorisation des véhicules électriques en 2014 a Biskra.
- [23] F.BAGHDADI « Modélisation et simulation des performances d'une installation hybride de conversion d'énergies renouvelables », Thèse de Magister de l'Université Mouloud Mammeri de TIZI-OUZOU, Soutenu le 26 /09 /2011.
- [24] A. BORNI, « Étude Et Optimisation D'un Multi Système Hybride De Conversion D'énergie Electrique ». puissance maximale dans les systèmes photovoltaïques».Master en électronique à bedjaia en 2013.
- [25] W.XIAO, « A Modified adaptative hill climbing maximum power point tracking (mppt) control method Thèse doctorat, université Constantine ,2015.

- [26] Edition. Masson en (1985). « Les piles solaires, le composant et ces applications ».
- [27] M. BELHADJ « Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome ». Thèse de Magister a Tlemcen en 2011
- [28] M.F.BEDRANE « Etude comparative entre quelques méthodes de poursuite du point de for photovoltaic power systems ». Thesis for degree of Master, The University of British Columbia, 2003.
- [29] <https://www.energreen.be>
- [30] I.ROUEN, « Rapport sur La pile à combustible » Projet de Physique P6 STPI/P6/2013 – 25.
- [31] L.ANTONI, J.POIROT-CROUVEZIER, F.ROY et X.GLIPA, << Pile à combustible GENEPAC >>, <http://www.cea.fr>, 4-2007.
- [32] M.T.BENMESSAOUD, « SYSTÈME D'ÉNERGIE HYBRIDE PV-SOFC Étude de cas de réalisation stationnaire à l'USTO >>. Thèse de doctorat en science 2012 U.S.T.O.
- [33] Le système hybride avec stockage Présenté par Monsieur LAOUAR Bachir Engineering SKTM « filiale de SONELGAZ ». www.era.dz .
- [34] Document sur la pile a combustible <http://omari.perso.univ-pau.fr>
- [35] COUPAN, Frédéric, « Stockage pour les énergies renouvelables: évaluation et modélisation de la batterie plomb-acide», Thèse de doctorat, Université de Guyane. 2017.
- [36] SAHÈI, Mounir. «Etude de la production d'hydrogène par électrolyse et pile à combustible».Mémoire de magister Université Mentouri de Constantine 2010.
- [37] A.DAMIEN, « Hydrogène par électrolyse de l'eau », Techniques de l'ingénieur, J 6366, 1992.
- [38] H.JANBEN.« High pressure electrolysis.The key technology for efficient H2 production >>, Proceedings of Hypothesis IV, Vol.1, pp.172-176, Stralsund, 2001.
- [39] J.LABBÉ, « l'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés », l'Ecole des Mines de Paris, décembre 2006.
- [40] H.WENT, B. ROHLAND, « Hydrogen production by water electrolysis >>, Kerntechnik 56 (1991) N°1.
- [41] Etude et réalisation de systèmes solaires et de réseaux de radiocommunication <https://www.solarcomfrance.fr>
- [42] S. AIT MAHREZ,B. ADJEROUD «Gestion optimale d'énergie d'un système PV/PAC avec stockage d'hydrogène ». Mémoire de master .Université Saâd Dahleb, Blida,2020.
- [43] H. Essakhi, «modélisation et simulation d'un module photovoltaïque», LASIME, ESTA Université Ibn Zohr, BP 33 (2019).
- [44] S.BENSMAIL «Contribution à La Modélisation Et à l'Optimisation Des Systèmes Photovoltaïque» . Mémoire de magister Université de A.MIRA-BEJAIA , 2012.
- [45] Y. Belkhier, M. Ait «Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque » .Mémoire de master .Université Abderrahmane Mira de Bejaia,2021.
- [46] Ulleberg, Øystein. "Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach." International journal of hydrogen energy 28.1 (2003): 21-33.
- [47] A.Khalilnejad.«A hybrid wind-PV system performance investigation for the purpose of maximum hydrogen production and storage using advanced alkaline electrolyzer»Energy Conversion and Management,Vol 80, April 2014, Pages 398-406
- [48] Yasuhito Hidaka, Koji Kawahara. « Modeling of a Hybrid System of Photovoltaic and Fuel cell for Operational Strategy in Residential Use ». 47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC). 2012.
- [49] A. Khalilnejad, A. Sundararajan, A.I. Sarwat. « Performance Evaluation of Optimal Photovoltaic-Electrolyzer System with the Purpose of Maximum Hydrogen Storage ». 2016-ESC-0074.
- [50] 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.

- [51] M FRADJ K MECHERI K «Etude et gestion d'un système hybride ». Mémoire de master. Université de kasdi merbah ouargla,2019.
- [52] H. Ismail « Etude et gestion d'un système d'énergie hybride ». Mémoire de Magister, Université de BEJAIA, 15/12/2015.
- [53] Bühler H., Réglage par logique floue, Presse Polytechnique et Universitaires Romandes, Lausanne 1994
- [54] J. C. Amphlett et al., Dynamic behavior of a PEM fuel cell stack for stationary applications, Int. J. Hydrogen Energy, vol. 26, pp. 625–629, 2001.
- [55] K.Chandler et B. L. Eudy, Thunder Power Bus Evaluation at Sun Line Transit Agency, prepared for the DOE, Contract No. DOE/GO-102003-1786, November 2003, Available: <http://www.eere.energy.gov>
- [56] Khaled Mammar, Abdelkader Chaker: Fuzzy Logic Control of Fuel Cell System for Residential Power Generation. Journal of ELECTRICAL ENGINEERING, Vol. 60, 328–334, No.6, 2009
- [57] M. Norgaard, O. Ravn, N. Poulsen et L. Hansen, Neural Networks for Modelling and Control of Dynamic Systems, Springer, London, 1st edition,2003.
- [58] M.Y. El-Sharkh, A. Rahman, M. S. Alam, P. C. Byrne, A. A. Sakla, et T. Thomas, •áA dynamic model for a stand-alone PEM fuel cell power plant for residential applications, Journal of Power Sources, vol. 138, n • < 1-2, novembre 2004, pp.199-204
- [59] EL H. AGLZIM, « Caractérisation par spectroscopie d'impédance de l'impédance complexe d'une pile à combustible en charge ». Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincare-Nancy1, 2009
- [60] J. C. Amphlett et al., Dynamic behavior of a PEM fuel cell stack for stationary applications, Int. J. Hydrogen Energy, vol. 26, pp. 625–629, 2001.
- [61] J. M. Corrêa, F.A. Farret, L.N. Canha et M. Godoy Simões, An electrochemical based fuel cell model suitable for electrical engineering automation approach, IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 51, n° 5, octobre 2004, pp. 1103
- [62] Amel Lachichi Thèse : Modélisation et stabilité d'un régulateur hybride de courant - Application aux convertisseurs pour pile à combustible». UNIVERSITE DE FRANCHECOMTE. 2005
- [63] Data sheet of a 500Wfuel cell stack. BCS Technologies, Englewood, CO, 2001.
- [64] R. Farkh , ìCOMMANDE PID DES SYSTEMES A RETARD íí.these,2011.
- [65] K.Astrom.1995.Hagglund. Pid controllers: theory, design and tuning. Second edition. Instrument society of America.
- [66] Y. Bendaha , ìcontribution a la commande avec et sans capteur mecanique d.un actionneur électrique íí ,These doctorat ,2013.
- [67] C. Lann, ìLe PID utilise en regulation de position et/ou de vitesse de moteurs électriquesíí,Imperial college London, 2006/2007.
- [68] P. DECAULNEi J.C. GILLE, M. PELEGRIN « Méthodes modernes d'étude des systèmes asservis ». DUNOD 1960.
- [69] P. Welander. 02/01/2010. Understanding derivative in pid control control engineering. Article
- [70] K.J.Astrom and T.Hagglund, « Automatic tuning of PID Controllers» .Research Triangle Park, NC : Instrum . Soc .Amer.1988.
- [71] K.J.Astrom and T.Hagglund, « Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins»,Automatica, vol.0, pp.645-651,1984.
- [72] M.Fellah. 2013. Automatique 1 et 2 (asservissements linéaires continus). Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique. Université Djillali Liabès – Sidi Bel-Abbès.
- [73] K. J. Astrom and T. Hagglund, "PID Controllers : Theory, Design,and Tuning", 2nd ed. Research Triangle Park, NC : Instrument Society of America, 1995.
- [74] OysteinUlleberg «Modeling of advancedalkalineelectrolyzers : a system simulation approach», International Journal of HydrogenEnergy, 28 (2003).

المخلص : ظهور الهيدروجين في الترويج والانتقال الطاقوي يشكل تحديًا حاليًا للباحثين والصناعات. إن إنتاج الطاقة الكهربائية من خلال الهيدروجين الأخضر الذي يغذي خلية وقود البروتونات المتبادلة الغشائية (PEMFC) هو محور دراسة هذه رسالة الماجستير في الهندسة الكهربائية الصناعية.

يمكن تلخيص النقاط الرئيسية المطروحة في هذه الرسالة على النحو التالي:

- عرض مكونات نظامنا ذو الطابع ثنائي الهجين من خلال مراجعة حالة الفن: مصدر الطاقة PV/PEMFC وتوليد الهيدروجين/الكهرباء. يتم تقديم الخصائص الفيزيائية والحرارية والكهربائية لفهم أفضل لعمل النظام، مع مراعاة العوامل الداخلية والخارجية التي تسهم في عمله.

- تم دراسة مصدر الطاقة الضوئية التي توفر الكهرباء اللازمة لجهاز التحليل بشكل جيد وتحسينها باستخدام خوارزمية PO تعتمد على اختيار لوح PV تجاري بقوة 250 واط. بمجرد تشغيل جهاز التحليل بواسطة الطاقة الشمسية، يبدأ في إنتاج وقود الهيدروجين (nH₂) تحت ضغط محدد (PH₂).

- النمذجة والمحاكاة لكومة PEMFC، التي تغذى بالهيدروجين المنتج في المرحلة السابقة، باستخدام MATLAB و Simulink، إلى جانب التحكم في الكومة باستخدام محاكي PI تقليدي، هو المساهمة الرئيسية في هذه الرسالة. تهدف لاكتشاف أداء الكومة كمصدر طاقة واعد.

Abstract: The emergence of hydrogen in energy promotion and transition poses a current challenge for researchers and industries. The production of electric energy through green hydrogen, which powers a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC), is the focus of study in this master's thesis in Industrial Electrotechnics.

The main points covered in this thesis can be summarized as follows:

- Presentation of the different components of our bi-hybrid system through a state-of-the-art review: the PV/PEMFC power source and the hydrogen/electricity energy generation. The physical, thermal, and electrical characteristics are presented to better understand the system's operation, considering internal and external factors that contribute to its functioning.

- The photovoltaic source, which provides the necessary electricity for the electrolyzer, is well-studied and optimized using a PO algorithm based on the choice of a commercial 250Wc PV panel. Once the electrolyzer is powered by PV, it starts producing hydrogen fuel (nH₂) at a given pressure (PH₂).

- The modeling and simulation of the PEMFC stack, fueled by the hydrogen produced in the previous phase, using MATLAB and Simulink, along with the control of the stack using a classic PI regulator, is the main contribution of this thesis. It aims to discover the performance of the stack as a promising energy source.

Résumé : L'émergence de l'hydrogène dans la promotion et la transition énergétique présente le challenge actuel des chercheurs et industriels. La production de l'énergie électrique par l'hydrogène vert alimentant une pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) présente notre intérêt d'étude dans ce travail de mémoire de fin d'étude de master en Electrotechnique industrielle

L'essentiel élaboré dans ce volume de mémoire se résume comme suit :

-Présentation dans un état de l'art les différentes parties formant notre système à caractère bi-hybride : dans la source d'électricité PV/PEMFC et dans la nature de l'énergie à produire Hydrogène/Electricité où les caractéristiques physiques, thermiques et électriques ont été présenté pour mieux comprendre le fonctionnement de système à étudier tout en tenant compte des phénomènes internes et externes qui contribuent au fonctionnement du système.

-La source photovoltaïque qui fournira l'électricité nécessaire à l'électrolyseur était bien étudié et optimisé par un algorithme PO La température basé sur un choix d'un panneau PV commercial 250Wc.

-Une fois l'électrolyseur est alimenté par le PV, il commence à produire de carburant Hydrogène nH₂ à une pression P_{H₂} donnée.

-La modélisation et la simulation de la pile PEMFC alimentée par l'hydrogène produit déjà dans la phase précédente et sous Matlab par l'élaboration des programmes et Simulink et le contrôle de la pile par des t régulateur classique PI était l'apport principal dans ce mémoire pour découvrir ainsi les performances de la pile comme étant une source d'énergie prometteuse.