

Faculté : Sciences Technologies  
Département : Génie Électrique  
N :



Filière : Energies Renouvelables  
Option : HVE

**Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master Professionnel**

**Par :**

Khajil Abdellahi  
Sedira Nahed Hana

**Intitulé**

---

**Valorisation de l'Hydrogène Vert dans un  
Système Hybride Photovoltaïque – Pile à  
Combustible pour l'Alimentation Autonome  
d'une Charge : Modélisation et Simulation  
sous MATLAB**

---

Soutenu le 17/06/2025 devant le jury composé de :

|                            |                             |  |
|----------------------------|-----------------------------|--|
| <b>Pr. BENGUESMIA Hani</b> | <b>Université de M'sila</b> | <b>Président</b>                             |
| <b>Pr. CHOUDER Aissa</b>   | <b>Université de M'sila</b> | <b>Encadreur</b>                             |
| <b>Dr. RIADH Rouabhi</b>   | <b>Université de M'sila</b> | <b>Maitre de conférences<br/>A Examineur</b> |

## *Dédicaces*

*À ma chère mère,*

*Pour ton amour inconditionnel, ton soutien sans faille et tes prières silencieuses. Tu es la lumière de ma vie et la source de ma force. Ce travail t'est dédié avec toute ma gratitude et mon affection.*

*À mon frère,*

*Merci pour ta présence, tes encouragements et ta confiance en moi. Ton soutien m'a été précieux tout au long de ce parcours.*

*À toute ma famille,*

*Pour votre amour, vos encouragements et votre compréhension. Vous avez été ma source d'inspiration et de stabilité.*

*À mes professeurs,*

*Depuis les premières années jusqu'à ce diplôme de Master, vous avez su éveiller ma curiosité, cultiver en moi le goût du savoir et me guider avec rigueur et bienveillance. Merci pour votre engagement et votre dévouement.*

*À ma binôme dans ce mémoire*

*Merci pour ta collaboration sincère, ton engagement constant et ton esprit d'équipe. Ce travail a été enrichi par nos échanges, notre complémentarité et notre persévérance commune. Je suis reconnaissant(e) d'avoir partagé cette expérience à tes côtés.*

*À mes amis fidèles,*

*Merci pour votre écoute, votre aide et votre bienveillance pendant les moments de doute et de fatigue.*

*À toutes les personnes qui ont cru en moi,*

*Votre foi en mes capacités m'a aidé à aller toujours plus loin. Mille mercis.*

***Khajil Abdellahi***

## *Dédicaces*

*Avec tous mes sentiments de respect avec L'expérience de ma reconnaissance je dédie ma remise de diplôme et ma joie*

*À mon paradis a la prunelle de mes yeux à la source de ma joie et mon bonheur, ma lune et le fil d'espoir qui allumer mon chemin pour ton amour ton prières tes encouragements*

*Ma moitié, ma chère maman*

*À celui qui ma donne son nom qui m'a fait une femme, ma source de vie, d'amour et d'affection*

*A mon support qui était toujours à mes côtés pour me soutenir et m'encourage, pour tout ce que tu as donné*

*Mon héro, A mon prince papa*

*À qui le Dieu ma donnés et il m'a béni avec leur amour mes fruits de la vie mes petites mes sœurs et mes frères (Malek Loudjaine Sadjia Salah et Ghaitih).*

*À mes professeurs pour leur dévouement leur patience et leur engagement constant dans la transmission du savoir.*

*Je dédie à tous celles et ceux qui m'ont encouragée soutenue et cru en moi à chaque étape*

*Vos mots vos gestes et votre présence ont été une source de motivation.*

*A moi...*

*A ma force, ma volonté et mes rêves...*

*Sans oublier mon binôme ABDELLEHI pour son soutien et son amitié son travaille et son compréhension tout au long de ce projet*

*Sedira Nahed Hana*

## **Remerciements**

*Avant toute chose, nous remercions Dieu Tout-Puissant de nous avoir donné la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.*

*Nous exprimons notre reconnaissance la plus sincère à Monsieur le Professeur **Aissa Chouder**, pour avoir accepté d'encadrer notre mémoire. Son expertise, sa disponibilité, sa pédagogie et ses conseils éclairés ont largement contribué à l'aboutissement de ce travail. Son accompagnement, aussi bien sur le plan scientifique qu'humain, a été pour nous d'un soutien précieux.*

*Nous remercions également l'ensemble des enseignants qui nous ont transmis leur savoir tout au long de notre parcours universitaire. Chacun d'eux a contribué, à sa manière, à forger notre esprit critique, notre méthode de travail et notre passion pour l'apprentissage.*

*Nos remerciements vont également à l'équipe pédagogique et administrative de l'Université Mohamed Boudiaf - M'sila, pour les moyens mis à notre disposition, leur disponibilité et leur accompagnement durant toutes les années de formation.*

*Nous exprimons notre gratitude à nos familles, pour leur amour, leur patience et leur soutien indéfectible tout au long de notre parcours. Sans leur présence et leurs encouragements constants, ce travail n'aurait pas été possible.*

*Enfin, nous remercions chaleureusement nos amis, collègues et camarades de promotion, pour les moments d'entraide, les échanges constructifs et les encouragements partagés.*

*À toutes celles et ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce mémoire, nous disons merci.*

# Table des matières

|  |           |
|--|-----------|
| Introduction générale  | 10        |
| <b>Chapitre I</b> <b>Généralité sur l'hydrogène</b> .....                                  | <b>12</b> |
| I.1 Historique et origine de l'hydrogène .....   | 13        |
| I.2 Technologies de production .....   | 17        |
| I.2.1 Cellule d'électrolyse .....  | 19        |
| I.2.2 Electrolyse de l'eau .....   | 19        |
| I.3 Stockage de l'hydrogène .....  | 21        |
| I.3.1 Les procédés physiques .....   | 22        |
| I.3.1.1 La compression.....  | 22        |
| I.3.1.2 Liquéfaction.....  | 23        |
| I.3.1.3 Adsorption sur les matériaux carbonés.....   | 23        |
| I.3.2 Les procédés chimiques.....  | 24        |
| I.3.2.1 Les hydrures métalliques .....   | 24        |
| I.4 Transport de l'hydrogène .....   | 27        |
| I.5 Positionnement dans la transition énergétique .....                                    | 28        |
| I.6 Quelle place pour l'hydrogène à 2050 ?.....  | 29        |
| I.7 Conclusion.....  | 31        |
| <br>   |           |
| <b>Chapitre II</b> <b>Système hybride PV-PAC</b> .....                                     | <b>32</b> |
| II.1 Généralité sur les systèmes hybrides.....   | 33        |
| II.2 Présentation des composants du système hybride.....                                   | 33        |
| II.2.1 Système photovoltaïque .....  | 33        |
| II.2.1.1 Les avantages des systèmes photovoltaïques .....                                  | 34        |
| II.2.1.2 Les inconvénients des systèmes photovoltaïques .....                              | 34        |
| II.2.1.3 L'effet photovoltaïque.....   | 35        |
| II.2.1.4 Différents types de cellules photovoltaïque .....                                 | 35        |
| II.2.1.5 Générateur photovoltaïque .....   | 37        |
| II.2.2 Pile à combustible .....  | 37        |
| II.2.2.1 Types de piles à combustible .....  | 38        |
| II.2.2.2 Principes de fonctionnement .....   | 38        |
| II.2.2.3 Système PAC et auxiliaires .....  | 40        |
| II.3 Conclusion.....   | 43        |
| <br>   |           |
| <b>Chapitre III</b> <b>Modélisation du système hybride</b> .....                           | <b>44</b> |
| III.1 Introduction.....  | 45        |
| III.2 Modélisation de la cellule photovoltaïque .....                                      | 45        |
| III.2.1 Le courant de court-circuit de la cellule PV .....                                 | 47        |
| III.2.2 La tension du circuit ouvert de la cellule PV .....                                | 48        |
| III.2.3 Caractéristique électrique de la cellule PV .....                                  | 48        |
| III.2.4 Effet de la température et de l'irradiation sur la performance de la cellule PV .. | 49        |
| III.2.4.1 Effet de la température.....   | 49        |
| III.2.4.2 Effet de l'irradiation.....  | 49        |

|  |           |
|--|-----------|
| III.2.5 Association des cellules pour former un générateur PV .....        | 50        |
| III.2.6 Suivi du point de puissance maximale (MPPT).....                   | 51        |
| III.2.6.1 Méthode de P&O .....   | 51        |
| III.2.6.2 Méthode Incremental Conductance .....                            | 52        |
| III.2.7 Convertisseur DC/DC .....  | 53        |
| III.2.7.1 Convertisseur DC/DC Boost.....                                   | 54        |
| III.2.7.2 Principe général de fonctionnement des onduleurs monophasés..... | 57        |
| III.3 Modélisation de la pile à combustible .....                          | 58        |
| III.3.1 Tension réversible d'une PAC .....                                 | 59        |
| III.3.1.1 Energie interne .....  | 59        |
| III.3.1.2 Energie de Gibbs.....  | 59        |
| III.3.1.3 Influence de la température.....                                 | 60        |
| III.3.1.4 Influence de la pression .....                                   | 61        |
| III.3.2 Potentiel de polarisation.....                                     | 62        |
| III.3.2.1 Potentiel d'activation .....                                     | 62        |
| III.3.2.2 Potentiel de résistance.....                                     | 66        |
| III.3.2.3 Potentiel de concentration.....                                  | 66        |
| III.3.3 Rendement d'une PEMFC .....  | 67        |
| III.4 Stratégie de gestion de l'énergie .....                              | 69        |
| III.5 Conclusion .....   | 72        |
| <br>   |           |
| <u>Chapitre IV</u> <u>Simulation et Analyse des résultats</u> .....        | <u>73</u> |
| IV.1 Introduction .....  | 74        |
| IV.2 Description du schéma global de simulation .....                      | 74        |
| IV.2.1 Bloc PV.....  | 75        |
| IV.2.1.1 Profile d'irradiation et de température.....                      | 75        |
| IV.2.1.2 Caractéristiques du champ photovoltaïque .....                    | 76        |
| IV.2.1.3 Algorithme MPPT (P&O) .....                                       | 77        |
| IV.2.1.4 Les composants du convertisseur DC/DC .....                       | 78        |
| IV.2.1.5 Les résultats de simulation du système PV .....                   | 78        |
| IV.2.1.6 Bloc PAC.....   | 79        |
| IV.2.1.7 Le débit d'hydrogène et d'oxygène .....                           | 80        |
| IV.2.1.8 Caractéristiques de la PAC sous Simulink .....                    | 80        |
| IV.2.1.9 Les résultats de simulation du système PAC.....                   | 81        |
| IV.2.1.10 Convertisseur DC/AC.....   | 82        |
| IV.2.1.11 Analyse des résultats de simulation du système .....             | 83        |
| IV.3 Conclusion .....  | 85        |
| <br>   |           |
| <u>Conclusion générale</u> .....   | <u>86</u> |
| <br>   |           |
| <u>Perspectives</u> .....  | <u>88</u> |
| <br>   |           |
| <u>Bibliographie</u> .....   | <u>89</u> |

## Liste des figures

|   |    |
|---|----|
| Figure I.1 : Premiers instants de l’histoire de l’hydrogène.....                      | 14 |
| Figure I.2 : Histoire contemporaine de l’hydrogène.....                               | 15 |
| Figure I.3 : Les différentes couleurs de l’hydrogène et leur origine.....             | 18 |
| Figure I.4 : Cellule d’électrolyse.....   | 19 |
| Figure I.5 : Capacités d’électrolyseurs installées 2021-2030.....                     | 21 |
| Figure I.6 : Prix des transports de l’hydrogène en fonction de la distance.....       | 28 |
| Figure II.1 : Principe de fonctionnement de la cellule PV.....                        | 35 |
| Figure II.2 : De la cellule au champ photovoltaïque.....                              | 37 |
| Figure II.3 : Schéma de principe d’une pile à combustible.....                        | 39 |
| Figure II.4 : Principe de fonctionnement d’une PEMFC.....                             | 39 |
| Figure II.5 : Système PAC et auxiliaires.....   | 40 |
| Figure III.1 : Modèle d’une cellule idéale.....                                       | 45 |
| Figure III.2 : Modèle d’une cellule réelle.....                                       | 46 |
| Figure III.3 : Caractéristiques de la courbe des cellules PV.....                     | 48 |
| Figure III.4 : Effet de la température sur I–V et P–V.....                            | 49 |
| Figure III.5 : Effet de l’irradiation sur I–V et P–V.....                             | 49 |
| Figure III.6 : Impact de l’association en série sur la courbe I–V.....                | 50 |
| Figure III.7 : Impact de l’association en parallèle sur la courbe I–V.....            | 50 |
| Figure III.8 : Caractéristique I–V d’un générateur PV série/parallèle.....            | 50 |
| Figure III.9 : l’organigramme de la méthode P&O.....                                  | 51 |
| Figure III.10 : l’organigramme de la méthode Incrémentale conductance.....            | 53 |
| Figure III.11 : Chaîne de conversion photovoltaïque.....                              | 54 |
| Figure III.12 : Schéma électrique d’un convertisseur DC/DC Boost.....                 | 54 |
| Figure III.13 : Schéma électrique d’un convertisseur DC/DC Boost fermé.....           | 55 |
| Figure III.14 : Schéma électrique d’un convertisseur DC/DC Boost ouvert.....          | 56 |
| Figure III.15 : Schéma de conversion DC-AC.....                                       | 57 |
| Figure III.16 : Fonctionnement de l’onduleur pendant la première demi-alternance..... | 57 |
| Figure III.17 : Fonctionnement de l’onduleur pendant la deuxième demi-alternance..... | 58 |
| Figure III.18 : Signal complet de l’onduleur.....                                     | 58 |
| Figure III.19 : courbe de polarisation d’une cellule de PEMFC.....                    | 62 |
| Figure III.20 : zone de triple contact.....   | 63 |
| Figure III.21 : représentation de l’équation de Butler-Volmer.....                    | 64 |
| Figure III.22 : Synoptique du système hybride.....                                    | 69 |
| Figure III.23 : logigramme fonctionnel du système de gestion.....                     | 70 |
| Figure IV.1 : Architecture du système PV–FC sous Simulink.....                        | 74 |
| Figure IV.2 : Modèle Simulink du système PV.....                                      | 75 |
| Figure IV.3 : Profils d’irradiation et de température.....                            | 76 |
| Figure IV.4 : Paramètres du GPV sous Simulink.....                                    | 76 |
| Figure IV.5 : Code MATLAB – MPPT (P&O).....   | 77 |
| Figure IV.6 : résultats de simulation du système PV.....                              | 78 |
| Figure IV.7 : Modèle Simulink du système PAC.....                                     | 79 |
| Figure IV.8 : Courbes V-I et P-I de la PAC.....                                       | 80 |
| Figure IV.9 : résultats de simulation du système PAC.....                             | 81 |
| Figure IV.10 : Résultats de simulation au bus DC.....                                 | 83 |
| Figure IV.11 : Résultats de simulation en sortie AC.....                              | 83 |

## Liste des tableaux

|  |    |
|--|----|
| Tableau I-1 : Les quatre types d'électrolyse de l'eau .....    | 20 |
| Tableau II-1 : Types de cellules photovoltaïques .....         | 36 |
| Tableau II-2 : les différentes technologies de PAC .....       | 38 |
| Tableau IV-1 : Spécifications électriques du module PV .....   | 77 |
| Tableau IV-2 : Paramètres des composants du convertisseur..... | 78 |

## Liste des abréviations

**PV** : Photovoltaïque

**PAC** : Pile à combustible

**PEMFC** : Proton Exchange Membrane Fuel Cell

**GDL** : Gas Diffusion Layer

**AME** : Assemblage Membrane-Électrodes

**GPV** : Générateur Photovoltaïque

**MPPT** : Maximum Power Point Tracking

**MPP** : Maximum Power Point

**PCI** : Pouvoir Calorifique Inférieur

**PCS** : Pouvoir Calorifique Supérieur

**PWM** : Pulse Width Modulation

**AC** : Alternating Current (Courant Alternatif)

**DC** : Direct Current (Courant Continu)

# Introduction générale

## **Introduction générale**

Face à la croissance rapide de la demande énergétique mondiale et à la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre, le développement de systèmes de production d'énergie propres et durables constitue un enjeu majeur. Parmi les solutions envisagées, les systèmes hybrides combinant différentes sources d'énergie renouvelable, comme le solaire et l'hydrogène, offrent des perspectives prometteuses en termes de fiabilité, d'autonomie et d'efficacité.

Le présent mémoire s'inscrit dans cette dynamique. Il porte sur l'étude, la modélisation et la simulation d'un système hybride associant un générateur photovoltaïque (PV) et une pile à combustible (PAC) de type PEMFC, destiné à l'alimentation d'une charge monophasée isolée. L'objectif principal est de concevoir un système capable de fonctionner de manière autonome, en garantissant une alimentation stable et continue, tout en maximisant l'exploitation de l'énergie solaire.

La première partie du mémoire est consacrée à la présentation du contexte énergétique mondial, des enjeux liés aux énergies renouvelables, ainsi que des principes fondamentaux des technologies mises en œuvre : cellules photovoltaïques, piles à combustible, et convertisseurs de puissance. La deuxième partie traite de la modélisation détaillée des différents sous-systèmes, incluant les équations caractéristiques et les mécanismes de régulation. Enfin, la dernière partie est dédiée à la simulation sous MATLAB/Simulink, avec une analyse critique des résultats obtenus et des performances globales du système.

À travers ce travail, il s'agit non seulement de valider un système hybride efficace en régime permanent, mais aussi de poser les fondations d'une plateforme évolutive, adaptable à d'autres configurations ou à des charges plus complexes dans le futur.

# Chapitre I

# Généralité sur l'hydrogène

## I.1 Historique et origine de l'hydrogène

L'hydrogène ( $H_2$ ) est la molécule la plus simple, mais aussi l'une des plus mystérieuses de la chimie. Bien qu'il existe naturellement dans certains environnements géologiques, sa présence sur Terre résulte essentiellement de procédés artificiels : la plupart du temps, l'hydrogène doit être produit par synthèse.

C'est d'ailleurs par hasard, au cours d'expériences alchimiques, que ce gaz a été observé pour la première fois il y a plus de cinq siècles. L'alchimiste et philosophe Paracelse, en mélangeant du vitriol (ancien nom de l'acide sulfurique) avec du fer, remarqua l'apparition d'un gaz invisible, inodore et incolore. Toutefois, incapable de déterminer sa nature, il ne comprit pas ce qu'il venait de découvrir.

À l'époque, l'étude des gaz, substances volatiles et insaisissables, était extrêmement difficile. Il fallut attendre plus d'un siècle avant que Robert Boyle, chimiste et physicien irlandais, réussisse à collecter ce gaz dans une fiole. Mais là encore, le mystère restait entier : il ne parvint pas à distinguer ce nouveau gaz de l'air ambiant. Au fil du temps, plusieurs chercheurs notèrent que ce gaz inconnu était hautement inflammable, voire explosif, lorsqu'il entrait en contact avec une flamme, libérant une énergie impressionnante.

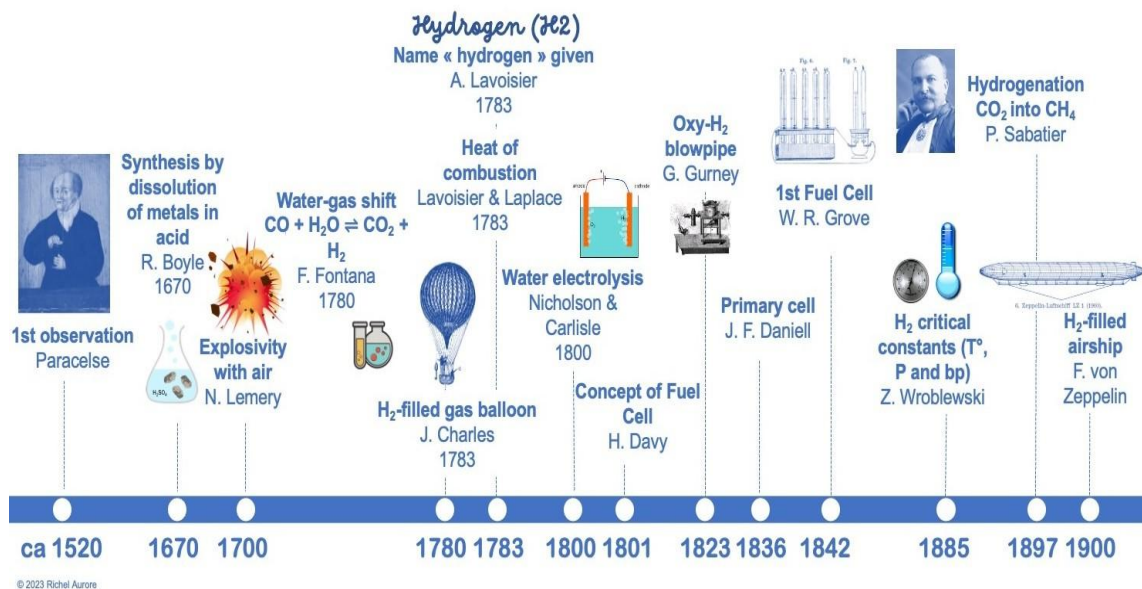
C'est au cours du Siècle des Lumières, alors que la chimie moderne prenait forme, qu'Antoine Lavoisier s'intéressa sérieusement à cette mystérieuse substance. En 1783, il l'identifia formellement et lui donna le nom d'hydrogène, après avoir constaté qu'il produisait de l'eau en réagissant avec l'oxygène.

Ce gaz, autrefois perçu comme une curiosité alchimique, fut ainsi reconnu comme une molécule artificielle que l'on pouvait obtenir par réaction chimique. À la fin du 18<sup>e</sup> siècle, l'hydrogène avait enfin un nom, une origine clairement définie, et une structure connue. Ses propriétés, progressivement révélées grâce aux progrès de la chimie, allaient ouvrir de nombreuses possibilités : sa légèreté permettait de gonfler ballons et dirigeables ; sa réaction avec l'oxygène produisait de l'eau et de l'énergie, exploitée aujourd'hui dans les piles à combustible.

Visionnaire, Jules Verne écrivait dès 1875 dans *L'Île mystérieuse* : L'hydrogène et l'oxygène seront, un jour, utilisés comme source inépuisable de chaleur et de lumière,

bien supérieure au charbon. Les soutes des navires à vapeur et les tenders des locomotives ne contiendront plus de charbon, mais ces deux gaz comprimés, brûlant dans les foyers avec une immense puissance calorifique.

Ainsi, ce gaz né des balbutiements de l'alchimie est devenu, au fil des siècles, un acteur essentiel des technologies énergétiques de demain.



**Figure I.1 :** Premiers instants de l'histoire de l'hydrogène

Bien avant que ne s'imposent les méthodes modernes, la production d'hydrogène dépassait déjà le simple recours à la réaction entre un acide et un métal. Un tournant majeur eut lieu en 1800, lorsque deux scientifiques britanniques, William Nicholson et Anthony Carlisle, réalisèrent une avancée remarquable. Peu après l'invention de la première pile électrique par Alessandro Volta, ils mirent au point une nouvelle technique : l'électrolyse de l'eau. Ce procédé ingénieux permettait de séparer les molécules d'eau en hydrogène et en oxygène en faisant circuler un courant électrique entre deux électrodes métalliques plongées dans l'eau.

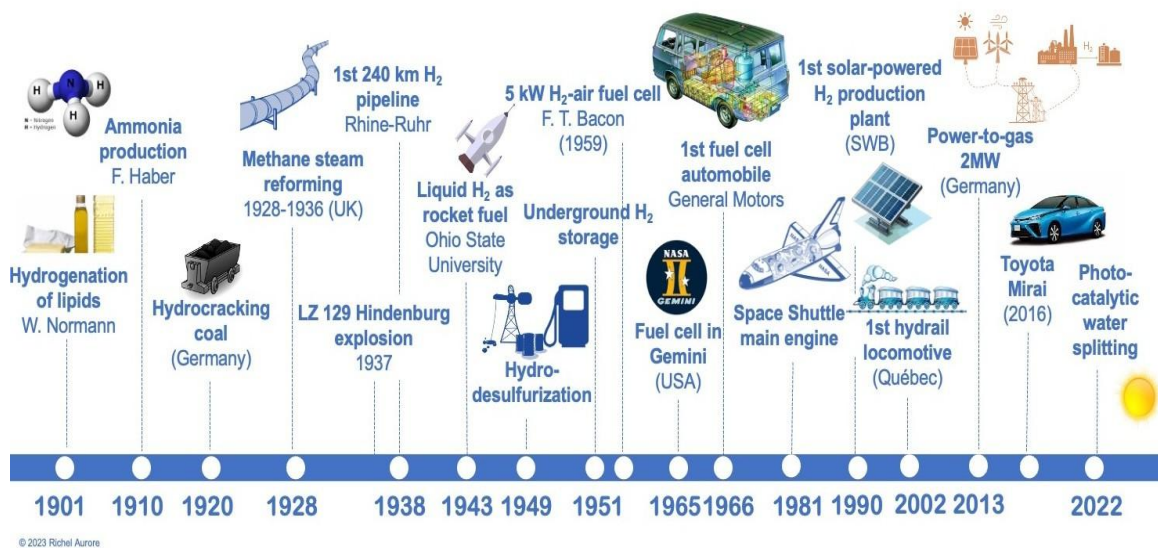
Il est fascinant de constater que cette découverte, apparue comme une prouesse scientifique au début du 19<sup>e</sup> siècle, allait redevenir deux siècles plus tard un enjeu central dans la recherche contemporaine. Face aux défis environnementaux et à la transition énergétique, l'électrolyse s'impose désormais comme une voie prometteuse pour produire un hydrogène vert, sans émissions de gaz à effet de serre.

Si l'intérêt initial pour l'hydrogène tenait à ses propriétés énergétiques et à sa faible densité, le 20<sup>e</sup> siècle marqua un tournant dans son exploitation industrielle, déjà pressenti

par Paul Sabatier dès 1897. Du fait de sa forte réactivité, l'hydrogène se montrait capable d'interagir avec diverses molécules, ouvrant la voie à des applications variées. Par exemple, en hydrogénant des huiles végétales liquides, on obtenait une matière solide : la margarine. En réagissant avec l'azote, dans des réacteurs catalytiques, il formait de l'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ), un composé clé dans la fabrication des engrais azotés.

L'hydrogène permettait également la synthèse de méthane ou de méthanol à partir du dioxyde ou du monoxyde de carbone ( $\text{CO}_2$  ou  $\text{CO}$ ), des procédés encore largement utilisés aujourd'hui. Enfin, à partir de 1949, l'hydrogène joua un rôle central dans la désulfuration des carburants, une technologie développée à grande échelle pour réduire la teneur en composés soufrés dans les produits pétroliers destinés aux transports.

Ces usages industriels, établis bien avant l'ère de l'hydrogène décarboné, témoignent de la polyvalence et de l'importance croissante de cette molécule dans les systèmes énergétiques et chimiques modernes.



**Figure I.2 :** Histoire contemporaine de l'hydrogène

Face à la demande industrielle croissante, l'électrolyse de l'eau, bien que techniquement maîtrisée depuis le 19<sup>e</sup> siècle, s'est rapidement révélée inadaptée à une production massive. Elle nécessitait une quantité d'énergie considérable pour un rendement encore trop faible. Confrontés à cette limitation, les chercheurs de l'époque se sont naturellement tournés vers les ressources fossiles, notamment le charbon et le gaz naturel, pour produire de l'hydrogène à plus grande échelle.

C'est ainsi qu'apparurent deux méthodes majeures : la gazéification du charbon, et le reformage à la vapeur du méthane. Ces procédés, développés dans les années 1920 et

1930, permirent d'industrialiser la production d'hydrogène. Toutefois, ils présentent un inconvénient majeur : leur empreinte carbone. En effet, ces technologies rejettent d'importantes quantités de dioxyde de carbone et autres composés polluants. Malgré cela, elles dominent encore aujourd'hui le secteur, représentant plus de 98 % de la production mondiale d'hydrogène.

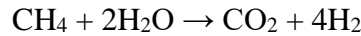
Après la Seconde Guerre mondiale, l'hydrogène commença à susciter un intérêt croissant dans le domaine de la mobilité. La technologie des piles à combustible, bien que découverte dès les années 1840, connut alors une évolution majeure. Ces dispositifs, capables de produire de l'électricité à partir de la réaction entre l'hydrogène et l'oxygène, furent au cœur de plusieurs expérimentations. En 1966, General Motors lança ainsi le tout premier véhicule automobile à hydrogène, suivi beaucoup plus tard, en 2016, par la commercialisation de la Toyota Mirai.

Au cours des trente dernières années, l'hydrogène a été testé comme solution énergétique pour les trains, les bus et les véhicules légers, avec des résultats variables selon les contextes. Par ailleurs, il a joué un rôle crucial dans l'exploration spatiale américaine, depuis les missions Gemini jusqu'aux dernières navettes spatiales. Les piles à combustible embarquées y servaient non seulement à produire de l'énergie, mais également à générer de l'eau potable pour les équipages, soulignant une fois de plus la polyvalence de cette molécule [1].

Après avoir exploré l'histoire fascinante de la découverte et de l'usage de l'hydrogène, il est essentiel de s'intéresser aux technologies actuelles permettant sa production, qui conditionnent son intégration dans le paysage énergétique moderne.

## I.2 Technologies de production

À l'heure actuelle, plus de 99 % de l'hydrogène utilisé dans le monde provient de sources fossiles. On parle d'« hydrogène noir » lorsqu'il est produit par gazéification du charbon sans captation du CO<sub>2</sub> émis. Lorsqu'il est issu du vaporeformage du gaz naturel, il est qualifié de « gris » s'il n'y a pas de captage du CO<sub>2</sub>, ou de « bleu » si le CO<sub>2</sub> est capté. Ce procédé repose sur une réaction catalytique à haute température.



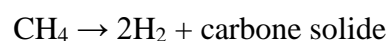
Ce procédé émet 10 kg de CO<sub>2</sub> par kg d'hydrogène produit [2, 3].

Les stratégies de décarbonation de la production d'hydrogène convergent toutes vers un objectif commun : le développement de l'hydrogène « vert ». Celui-ci est produit par électrolyse de l'eau à partir d'électricité issue de sources renouvelables (comme l'éolien ou le solaire), par reformage du biogaz ou encore par gazéification de la biomasse. Ce constat appelle deux commentaires.

Tout d'abord, la production d'hydrogène à partir de biogaz ou de biomasse doit être écartée, compte tenu des usages déjà nombreux et prévus de la biomasse, ainsi que des contraintes liées à son exploitation, notamment la concurrence avec la production agroalimentaire et l'insuffisance des ressources disponibles. Cette position a d'ailleurs été récemment soulignée dans un rapport du Comité de prospective en énergie de l'Académie des sciences [2, 4].

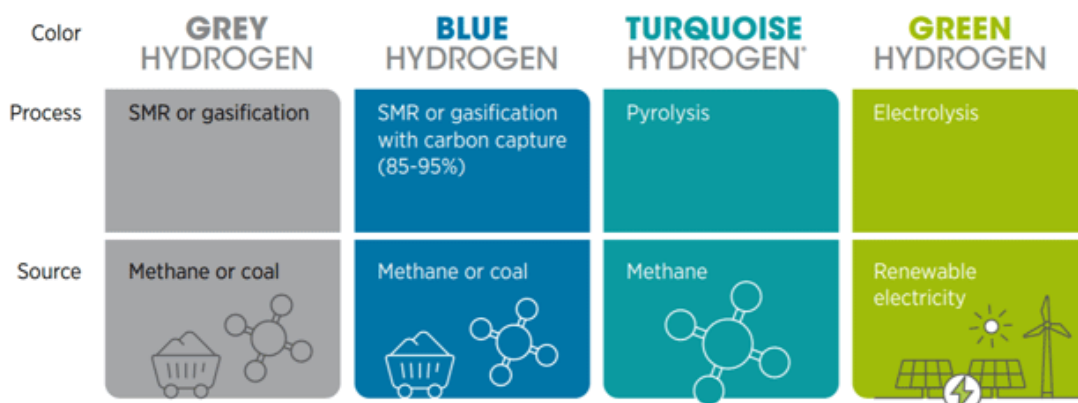
Par ailleurs, il est essentiel de souligner que toutes les sources d'énergie bas carbone doivent être mobilisées pour produire un hydrogène véritablement « vert » et en faire un levier majeur de la décarbonation. Cela inclut naturellement l'énergie nucléaire, qui constitue une source bas carbone par excellence. Dès lors, la distinction entre hydrogène dit « vert » issu exclusivement d'électricité renouvelable et hydrogène « jaune » produit par électrolyse en incluant également l'électricité d'origine nucléaire perd de sa pertinence. En réalité, dans les deux cas, l'hydrogène est généré par un même procédé : l'électrolyse de l'eau.

Pour terminer avec les différentes couleurs de l'hydrogène, mentionnons l'hydrogène dit « turquoise », produit par pyrolyse du méthane sans émission de CO<sub>2</sub>. Ce procédé repose sur une réaction thermochimique à haute température.



Ce procédé génère environ 3 kg de carbone solide pour chaque kilogramme d'hydrogène produit. Ce carbone peut être valorisé, notamment comme matériau de construction ou comme amendement pour les sols agricoles. Toutefois, l'existence d'un marché significatif pour ce type de matériau reste incertaine. Bien que l'hydrogène turquoise présente l'avantage d'une consommation énergétique réduite, sa contribution à la production mondiale d'hydrogène demeurera probablement marginale [2].

La Figure I.3 illustre les différentes formes d'hydrogène en fonction de leur procédé de production et de leur source énergétique, classées par code couleur.



**Figure I.3 :** Les différentes couleurs de l'hydrogène et leur origine

L'eau, ressource quasiment inépuisable, et la possibilité d'utiliser une énergie bas carbone font de l'électrolyse de l'eau la technologie centrale pour le développement d'une filière hydrogène durable. Toutefois, en raison de sa forte consommation énergétique, cette technologie suscite un intérêt croissant et fait l'objet de nombreuses recherches au sein des laboratoires industriels. Malgré les avancées récentes, la contribution de l'électrolyse à la production mondiale d'hydrogène reste marginale. Cela s'explique par les défis technologiques persistants et les coûts encore trop élevés. Ainsi, malgré des investissements massifs depuis plusieurs décennies, elle ne représente que quelques pourcents de la production dans les pays industrialisés (moins de 1 % à l'échelle mondiale). Des efforts importants restent nécessaires en matière de recherche et d'innovation pour permettre un déploiement à grande échelle de l'hydrogène vert, en particulier à travers le développement de nouveaux matériaux, de membranes plus performantes et de procédés plus efficaces [2].

### I.2.1 Cellule d'électrolyse

Les cellules électrolytiques, également appelées cellules d'électrolyse, sont des dispositifs électrochimiques permettant de réaliser l'électrolyse de certains composés. Par exemple, elles peuvent être utilisées pour dissocier l'eau en gaz dihydrogène (H<sub>2</sub>) et dioxygène (O<sub>2</sub>). Ce procédé repose sur le passage d'un courant électrique dans le milieu réactionnel, lequel fournit l'énergie nécessaire pour surmonter l'énergie d'activation d'une réaction d'oxydoréduction qui, en conditions normales, ne se produirait pas spontanément.

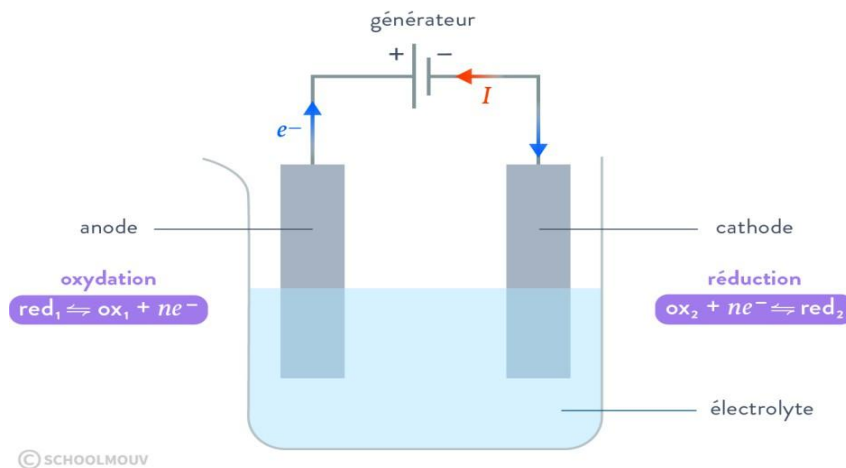
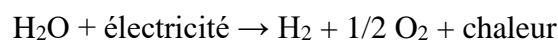


Figure I.4 : Cellule d'électrolyse

### I.2.2 Electrolyse de l'eau

L'électrolyse de l'eau est réalisée à l'aide d'un électrolyseur alimenté par une source d'électricité. Cette source peut provenir du réseau électrique, d'installations utilisant des énergies renouvelables (telles qu'une ferme solaire, un parc éolien ou une centrale hydroélectrique), ou encore d'un site spécifiquement dédié à la production d'hydrogène. L'électrolyseur est composé de deux électrodes, chacune placée dans un compartiment distinct. Dans l'un, la cathode permet la réduction catalytique de l'eau en hydrogène ; dans l'autre, l'anode permet l'oxydation de l'eau en oxygène. Ces deux réactions électrochimiques se produisent lorsque l'électrolyseur est alimenté en courant, selon la réaction suivante :



Quatre types d'électrolyse peuvent être distinguées et sont présentées dans le Tableau I-1 :

**Tableau I-1** : Les quatre types d'électrolyse de l'eau

| <b>Types d'électrolyse</b>  | <b>Avantages</b>  | <b>Limites</b>   |
|---|---|--|
| <p><b>Électrolyse alcaline</b></p> <p>Elle utilise une solution aqueuse d'acide sulfurique (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) ou d'hydroxyde de potassium (KOH). Il s'agit de la technologie la plus éprouvée et la plus économique, exploitée à l'échelle industrielle depuis de nombreuses années.</p> | <p>Elle repose sur l'utilisation de matériaux d'électrodes abondants et peu coûteux, tels que l'acier ou le nickel.</p>   | <p>Elle présente des rendements relativement faibles (environ 60 à 65 %) et une forte sensibilité aux variations de courant, ce qui limite son couplage direct avec des sources d'énergie intermittentes, comme le solaire ou l'éolien.</p>  |
| <p><b>Électrolyse à membranes échangeuses de protons</b></p> <p>Plus récente, cette technologie demeure encore en phase de développement à l'échelle industrielle.</p>  | <p>Elle fonctionne à basse température, généralement proche de la température ambiante, et présente une bonne compatibilité avec des sources électriques intermittentes telles que le solaire ou l'éolien.</p>  | <p>Cette technologie présente plusieurs limites telle que : (i) les membranes polymères, essentielles pour maintenir la neutralité électrique, sont à la fois coûteuses et fragiles, (ii) le fonctionnement en milieu acide engendre des phénomènes de corrosion, nécessitant l'usage de catalyseurs à base de métaux nobles comme le platine et l'iridium, qui sont rares et onéreux, (iii) les rendements énergétiques demeurent modestes, atteignant au mieux 65 %.</p> |
| <p><b>Électrolyse à haute température et à oxydes solides</b></p> <p>Technologie la moins avancée. En France, Genvia vise un électrolyseur de 1 MW d'ici 2026, capable de produire 600 kg d'H<sub>2</sub> par jour.</p>   | <p>Fonctionne à haute température (700–950 °C), ce qui permet d'atteindre des rendements élevés (&gt; 80 %). Utilise des catalyseurs à base de métaux non nobles comme le nickel ou des oxydes métalliques.</p> | <p>Les membranes céramiques, bien qu'adaptées à la haute température, restent fragiles. Le système est sensible aux variations thermiques.</p>   |
| <p><b>Électrolyse à membranes échangeuses d'anions (AEM)</b></p>  | <p>Utilise des catalyseurs à base de métaux non nobles, comme le nickel ou des oxydes métalliques.</p>  | <p>Technologie récente, encore à un stade préindustriel.</p>   |

La fabrication d'électrolyseurs constitue un enjeu industriel stratégique pour assurer la souveraineté énergétique, au même titre que celle des batteries, des véhicules électriques, des panneaux solaires ou des éoliennes. C'est dans cette optique que l'État français et l'Union européenne multiplient les efforts afin de soutenir le développement d'une filière d'électrolyseurs performante et compétitive. À l'échelle mondiale, ce secteur est aujourd'hui largement dominé par la Chine et les États-Unis [2], (voir la Figure I.5).

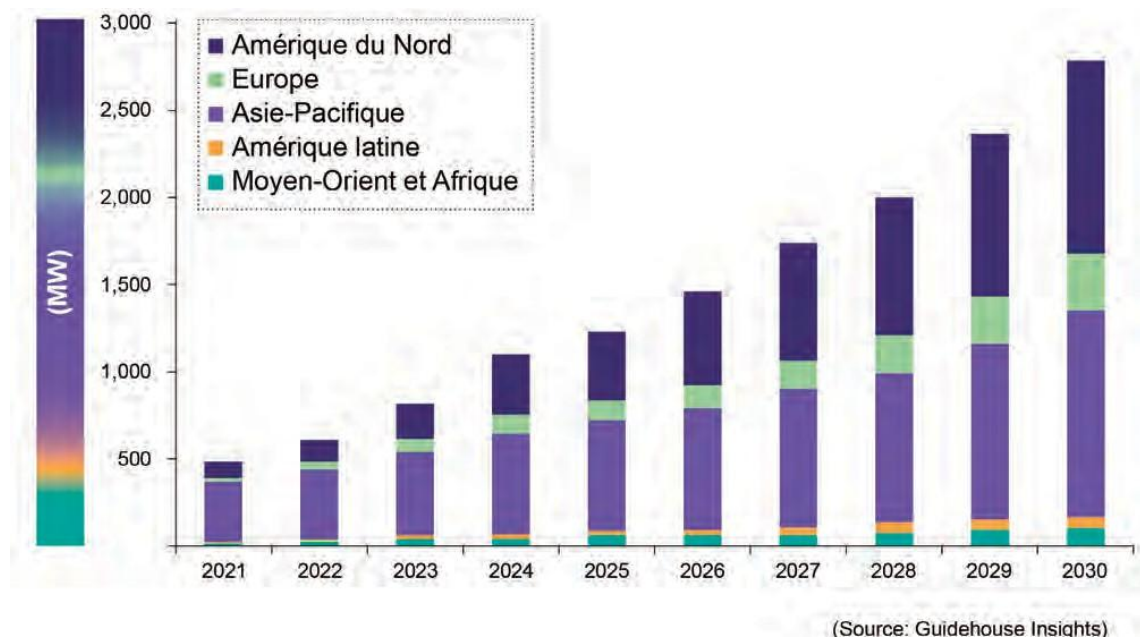


Figure I.5 : Capacités d'électrolyseurs installées 2021-2030

Si la production de l'hydrogène constitue une étape cruciale, son stockage en est une autre tout aussi déterminante. En raison de ses propriétés physiques particulières, plusieurs méthodes ont été développées pour stocker l'hydrogène de manière sûre et efficace.

### I.3 Stockage de l'hydrogène

Lorsque l'hydrogène n'est pas produit à proximité de son lieu d'utilisation, il doit être stocké, transporté et distribué. En raison de sa faible densité énergétique par unité de volume, il est indispensable de le comprimer ou de le liquéfier pour le rendre compatible avec les différents usages envisagés, notamment dans les domaines de la mobilité et du chauffage.

Face aux enjeux liés à l'épuisement progressif des énergies fossiles et à la lutte contre le réchauffement climatique, l'hydrogène apparaît comme une solution prometteuse en tant que vecteur énergétique. Néanmoins, l'un des principaux défis, au-delà de sa production

puisqu'il n'est pas disponible à l'état naturel comme on a déjà dit, réside dans sa faible densité volumique, qui rend nécessaire le développement de solutions de stockage à la fois performantes et sûres. Quel que soit le mode de production (reformage, électrolyse, etc.), l'usage envisagé (pile à combustible, moteur thermique, etc.) ou l'ampleur de son intégration dans l'économie (de l'utilisation ponctuelle à l'émergence d'une éventuelle "civilisation de l'hydrogène"), la question du stockage reste centrale. En effet, ce gaz, peu dense et potentiellement explosif, impose des solutions techniques rigoureuses.

Plusieurs options de stockage sont aujourd'hui à l'étude ou en développement, parmi lesquelles : le stockage gazeux sous haute pression, le stockage liquide à l'état cryogénique, et le stockage solide via des hydrures métalliques ou des matériaux adsorbants. Chacune de ces technologies présente des avantages et des inconvénients, notamment en termes de rendement énergétique, de faisabilité technique, de coût et de sécurité. Ces aspects feront l'objet d'une analyse détaillée dans la suite [5].

### **I.3.1 Les procédés physiques**

#### **I.3.1.1 La compression**

Le stockage de l'hydrogène sous forme gazeuse comprimée est aujourd'hui l'une des méthodes les plus répandues, utilisée notamment par des industriels tels qu'Air Liquide, Linde Gas ou Air Products. Les pressions de stockage varient généralement entre 200-350 bar, pouvant atteindre jusqu'à 700 bar pour les applications les plus exigeantes. La compression est souvent réalisée de manière adiabatique, en plusieurs étages, avec un refroidissement intermédiaire afin de limiter l'échauffement du gaz. Lors d'un remplissage rapide, une élévation notable de la température peut être observée. On estime que l'énergie nécessaire pour comprimer l'hydrogène de 1 à 700 bar représente environ 10 % de son pouvoir calorifique inférieur (PCI).

Ce gaz peut être stocké dans des contenants de tailles diverses, allant de bouteilles de 10 litres à des réservoirs industriels pouvant contenir jusqu'à 10000 m<sup>3</sup>. Les bouteilles actuellement commercialisées (notamment de 50 litres) permettent un stockage à des pressions pouvant atteindre 350 bar. Les réservoirs sont généralement de forme ronde ou cylindrique, fabriqués à partir d'alliages métalliques hautement résistants à la corrosion. Afin de réduire leur poids, des matériaux composites comme les polymères et les fibres de carbone sont de plus en plus intégrés dans leur conception.

Cependant, cette technique présente plusieurs inconvénients majeurs :

- Sa faible densité volumétrique
- Pour le stockage à hautes pressions, l'adaptation des auxiliaires : valves, capteurs, détendeurs.

L'hydrogène peut également être stocké sous terre sous forme gazeuse comprimée. À l'image du gaz naturel, certaines formations géologiques comme les aquifères ou les cavités issues de l'exploitation de gisements de sel gemme (salt caverns) sont déjà utilisées à cet effet. Par exemple, la ville de Kiel, en Allemagne, stocke du gaz de ville depuis 1971. En France, GDF utilise ce procédé pour stocker un mélange de gaz naturel enrichi en hydrogène, tandis qu'au Royaume-Uni, la société ICI (Imperial Chemical Industries) stocke de l'hydrogène dans des mines de sel. Ce mode de stockage n'est toutefois pertinent que pour de grandes quantités d'hydrogène, en raison de l'ampleur des infrastructures requises [6, 7].

### **I.3.1.2 Liquéfaction**

Cette méthode de stockage consiste à conserver l'hydrogène sous forme liquide à une température extrêmement basse, de l'ordre de  $-253\text{ °C}$ . Les réservoirs utilisés sont généralement dotés d'une double paroi, séparée par un espace destiné à limiter les pertes thermiques par convection. Cet espace peut être maintenu sous vide, rempli d'air liquide (comme le propose Linde Gas), ou composé de matériaux super-isolants. Bien que l'acier soit couramment utilisé pour la fabrication de ces réservoirs, des matériaux composites sont en cours de développement afin d'en réduire le poids.

Ce mode de stockage permet d'atteindre une densité énergétique de l'ordre de  $22\text{ MJ/kg}$  (réservoir inclus). Toutefois, en raison des températures cryogéniques, les pertes thermiques sont inévitables, tout comme l'évaporation partielle de l'hydrogène, un phénomène connu sous le nom de « boil-off ». Grâce aux avancées technologiques, ce taux d'évaporation a pu être réduit à environ  $1\%$  par jour. Néanmoins, la liquéfaction de l'hydrogène reste un procédé énergivore, représentant près de  $30\%$  de son pouvoir calorifique inférieur (PCI) [7].

### **I.3.1.3 Adsorption sur les matériaux carbonés**

Le stockage de l'hydrogène par adsorption sur du charbon actif est une technique connue de longue date. À température et pression ambiantes, cette méthode permet d'atteindre

une densité énergétique d'environ 0,5 % en masse. Toutefois, à très basse température (-186 °C) et sous haute pression (environ 60 bar), des densités allant jusqu'à 8 % en masse peuvent être obtenues.

Plus récemment, l'attention s'est portée sur de nouveaux matériaux tels que les nanofibres et les nanotubes de carbone, bien que leur efficacité reste encore à démontrer. Ce mode de stockage repose sur le principe de l'adsorption en surface : l'hydrogène est retenu par des forces de Van der Waals sur les parois internes du matériau. Plusieurs études ont mis en évidence le fort potentiel d'adsorption des nanotubes et nanofibres de carbone. Néanmoins, cette technologie est encore en phase de recherche, avec des efforts en cours pour améliorer ses performances, notamment par l'introduction de dopants et l'optimisation des procédés de fabrication à grande échelle [7].

### **I.3.2 Les procédés chimiques**

#### **I.3.2.1 Les hydrures métalliques**

Les hydrures métalliques sont des composés dans lesquels les atomes d'hydrogène forment des liaisons covalentes ou ioniques avec les atomes métalliques voisins. Où l'interaction entre l'hydrogène et le métal est de nature métallique. On distingue deux grandes familles d'hydrures : les hydrures de métaux de transition, tels que BaReH<sub>9</sub> ou Mg<sub>2</sub>FeH<sub>6</sub>, et ceux de métaux hors transition, comme NaAlH<sub>4</sub> et LiBH<sub>4</sub>.

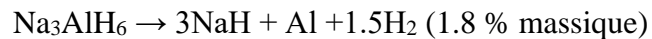
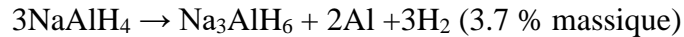
Sur le plan des performances de stockage, la première famille présente des rapports hydrogène/métal élevés (par exemple H/M = 4,5 pour le BaReH<sub>9</sub>) ainsi qu'une forte densité volumique (jusqu'à 150 g/dm<sup>3</sup> dans le Mg<sub>2</sub>FeH<sub>6</sub>). Toutefois, ces composés sont thermodynamiquement très stables : des températures supérieures à 300 °C sont généralement requises pour atteindre une pression de désorption de 1 bar.

Les hydrures complexes de métaux non transitionnels, en revanche, offrent des températures de désorption plus modérées, ce qui les rend plus adaptés aux applications proches des conditions ambiantes. L'alane de sodium (NaAlH<sub>4</sub>), en particulier, est considéré comme l'un des matériaux les plus prometteurs pour le stockage réversible de l'hydrogène.

Les alanates, appartenant à cette famille, sont généralement représentés par la formule A<sub>x</sub>[Al<sub>y</sub>H<sub>z</sub>], où A est un métal alcalin (Li, Na) ou une terre alcaline (Mg, Ca). Leur

structure est basée sur l'anion complexe  $[\text{AlH}_4]^-$ , dont la charge est compensée par un cation. Les atomes d'hydrogène y sont liés à l'aluminium par des liaisons covalentes dans une configuration tétraédrique.

La désorption de l'hydrogène à partir des alanates se déroule en deux étapes. Pour l'alanate de sodium, qui possède une capacité de stockage de 5,5 % en masse, ces étapes sont les suivantes :



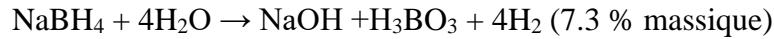
L'alanate de sodium présente des propriétés thermodynamiques intéressantes pour le stockage réversible de l'hydrogène. Sa première étape de désorption permet de libérer de l'hydrogène à pression atmosphérique dès 33 °C, tandis que la seconde intervient à 110 °C. Bien que la décomposition complète de l'hydrure de sodium pourrait théoriquement libérer 2 % massique supplémentaire d'hydrogène, elle nécessite des températures trop élevées pour être exploitable en pratique.

Initialement, la réhydrogénation du  $\text{NaAlH}_4$  pur demandait des conditions particulièrement sévères (300 °C, 400 bar), ce qui a longtemps freiné son utilisation pour des applications réversibles. Cependant, des travaux ont démontré qu'il est possible de réduire considérablement ces contraintes en ajoutant environ 3 % molaire d'un catalyseur à base de titane.

La recherche dans le domaine des hydrures vise principalement à améliorer leurs propriétés thermodynamiques et cinétiques. Sur le plan thermodynamique, des éléments substituants sont étudiés afin d'ajuster les températures et pressions de désorption aux exigences des applications visées. Toutefois, cette démarche s'avère bien plus complexe que pour les hydrures interstitiels.

Côté cinétique, l'essentiel des recherches porte sur la compréhension des mécanismes catalytiques afin de concevoir des catalyseurs plus efficaces. La sécurité constitue également un enjeu majeur, car ces composés deviennent particulièrement réactifs à l'eau et à l'air, surtout après incorporation du catalyseur.

Un autre axe prometteur concerne le stockage via voie hydrolytique. Certains hydrures métalliques légers peuvent libérer de grandes quantités d'hydrogène par hydrolyse, combinant celui de l'hydrure et celui de l'eau. L'exemple le plus notable est l'hydrolyse du borohydrure de sodium, qui sera présenté ci-après.



En pratique, le borohydrure de sodium est utilisé sous forme liquide, généralement en solution aqueuse contenant 25 % de  $\text{NaBH}_4$  et 2 % de  $\text{NaOH}$ . Lorsqu'elle entre en contact avec un catalyseur à base de ruthénium, cette solution libère de l'hydrogène avec un rendement d'environ 5,3 % en masse. Le résidu de la réaction est une solution aqueuse de métaborate de sodium ( $\text{NaBO}_2$ ).

L'un des inconvénients majeurs de cette méthode est son caractère non réversible : l'hydrogène une fois libéré, le borohydrure ne peut pas être régénéré in situ. Le traitement de la solution résiduelle nécessite une régénération externe coûteuse pour reconstituer le  $\text{NaBH}_4$ .

Les imides et amides représentent une autre classe de matériaux apparentée aux hydrures, et présentent un fort potentiel pour le stockage d'hydrogène. Des performances remarquables ont été observées dans le système Li-N-H, notamment avec le nitrure de lithium ( $\text{Li}_3\text{N}$ ), capable de stocker jusqu'à 9,3 % en masse d'hydrogène à 255 °C sous une pression modérée de 3 bar. Ce stockage s'effectue en deux étapes, décrites ci-dessous.



La seconde étape du processus, représentant une capacité de stockage de 6,5 % en masse, est réversible. Elle se caractérise par un plateau de pression situé autour de 1 bar à une température de 285 °C. La désorption de l'hydrogène à partir de l'amide de lithium ( $\text{LiNH}_2$ ) semble s'accompagner de la formation intermédiaire d'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ). Ce dernier réagit ensuite avec l'hydrure de lithium ( $\text{LiH}$ ) pour former de l'imide de lithium ( $\text{Li}_2\text{NH}$ ).

Il a été rapporté que, en présence de catalyseur  $\text{TiCl}_3$ , cette réaction entre  $\text{NH}_3$  et  $\text{LiH}$  est suffisamment rapide pour empêcher toute libération de vapeur d'ammoniac durant la désorption. Toutefois, étant donné la toxicité élevée de l'ammoniac, ces résultats

nécessitent encore d'être validés expérimentalement afin d'assurer la sécurité d'un éventuel usage de ces composés pour le stockage réversible de l'hydrogène [5].

Une fois produit et stocké, l'hydrogène doit souvent être transporté jusqu'à son lieu d'utilisation.

## **I.4 Transport de l'hydrogène**

Le choix du mode de transport de l'hydrogène dépend principalement de deux facteurs : la distance à parcourir et le débit à acheminer. Chaque solution de transport présente des caractéristiques spécifiques qu'il convient d'analyser en fonction de ces paramètres.

- Coûts d'investissements, CAPEX (CAPital EXpenditures)
- Coûts opérationnels fixes
- Coûts opérationnels variables avec la distance

La somme des coûts fixes et variables constitue l'OPEX (Operational Expenditures), correspondant au coût marginal du transport d'une unité supplémentaire d'hydrogène.

Les différents modes de transport répondent à des besoins distincts et s'avèrent davantage complémentaires que concurrents.

- **Camion-citerne** : Ce mode est principalement destiné aux petits consommateurs non raccordés au réseau. Il est utilisé pour les derniers kilomètres, reliant une station de compression au point de consommation. Cette solution implique des CAPEX importants (notamment pour l'installation d'une station de compression), ainsi que des coûts opérationnels élevés (entretien, carburant, personnel, logistique routière). Elle ne devient donc économiquement viable que pour des quantités très limitées d'hydrogène.
- **Pipeline** : Les canalisations constituent, dans la majorité des cas, le mode de transport le plus performant. Bien qu'ils nécessitent un investissement initial élevé, les pipelines offrent une exploitation peu coûteuse. Ils sont particulièrement adaptés aux distances inférieures à 3000 km, et restent rentables pour un large éventail de débits. Le CAPEX est proportionnel à la distance à parcourir, mais les OPEX restent relativement faibles.

- Transport maritime : Pour des distances supérieures à 3000 km, le transport par bateau devient une option envisageable. Cette solution repose généralement sur la liquéfaction ou la conversion chimique de l'hydrogène (sous forme d'ammoniac ou autre vecteur moléculaire). Bien que le CAPEX soit élevé, il est indépendant de la distance : il suffit de construire deux terminaux, sans nécessité d'une infrastructure intermédiaire. En revanche, les coûts d'exploitation (fonctionnement des navires, entretien, gestion portuaire, etc.) restent relativement élevés [3].

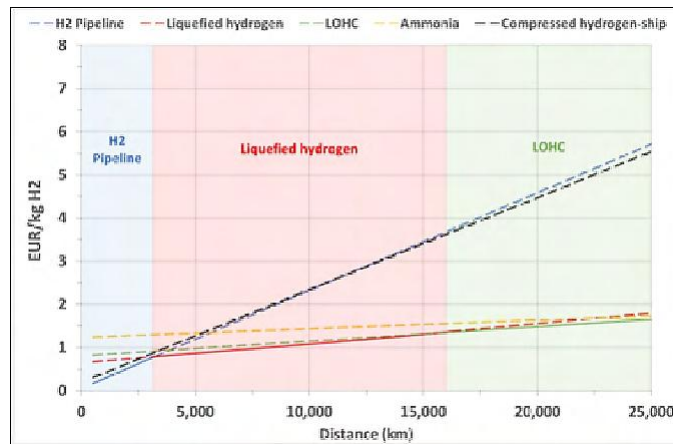


Figure I.6 : Prix des transports de l'hydrogène en fonction de la distance

Au-delà des aspects techniques, l'hydrogène joue désormais un rôle stratégique dans la transition énergétique. Son potentiel à contribuer à la décarbonation des secteurs difficiles à électrifier en fait un levier clé des politiques climatiques.

## I.5 Positionnement dans la transition énergétique

La loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) a fixé, à l'horizon 2030, des objectifs ambitieux : atteindre 32 % d'énergies renouvelables (ENR) dans la consommation finale d'énergie et 40 % dans la production d'électricité. En 2017, les ENR ont couvert 18,5 % de la consommation d'électricité en France, réparties comme suit : hydroélectricité (10,1 %), éolien (5,0 %), solaire photovoltaïque (1,9 %) et bioénergies (1,5 %).

Aux niveaux actuels de production éolienne et solaire, l'intégration de ces énergies renouvelables variables au système électrique ne soulève pas de difficultés majeures, grâce aux flexibilités existantes. Toutefois, leur développement futur nécessitera des solutions efficaces de valorisation de leur production intermittente.

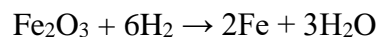
La production décarbonée d'hydrogène par électrolyse de l'eau constitue l'une de ces solutions, au même titre que les autres technologies de stockage. Elle offre un potentiel important, grâce à sa flexibilité : les électrolyseurs, gros consommateurs d'électricité, peuvent démarrer ou s'arrêter en quelques minutes en fonction de la disponibilité de l'énergie renouvelable (vent ou soleil). Ainsi, ils peuvent absorber les surplus de production électrique lorsque la demande est faible, et les transformer en hydrogène. Par leur capacité à moduler leur puissance en temps réel, les électrolyseurs peuvent également fournir différents services au réseau électrique [8].

Dans cette perspective de transition énergétique, il est essentiel de se projeter à long terme, notamment à l'horizon 2050, afin d'évaluer la place que l'hydrogène pourrait occuper dans le mix énergétique mondial, en fonction des usages envisagés et des investissements engagés.

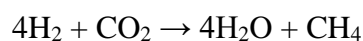
## I.6 Quelle place pour l'hydrogène à 2050 ?

D'après les différents rapports européens, la part de l'hydrogène dans le mix énergétique de 2050 se situera entre 5% et 10%. L'hydrogène sera probablement utilisé dans :

- La sidérurgie en tant que réducteur des minerais de fer.



- Les transports (ICE (Internal Combustion Engine) à hydrogène ou PAC (Pile A Combustible)).
- Power-to-gas : l'hydrogène est injecté dans le réseau gazier et utilisé comme combustible.
- Power-to-gas-to-power : L'hydrogène peut être utilisé comme vecteur de stockage pour les énergies renouvelables intermittentes. Il est produit par électrolyse de l'eau (Power-to-Gas), puis reconverti en électricité à l'aide d'une pile à combustible (Gas-to-Power) afin d'alimenter le réseau en période de forte demande.
- La Méthanation : La méthanation est le processus inverse du reformage du méthane : elle consiste à synthétiser du "e-méthane" en combinant de l'hydrogène avec du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>).



Le méthane synthétisé peut ensuite être injecté dans le réseau de gaz naturel. Chaque type d'usage de l'hydrogène implique des niveaux de coûts différents, ce qui rend certaines applications plus pertinentes que d'autres selon les contextes économiques et technologiques [3].

## **I.7 Conclusion**

L'hydrogène, longtemps relégué au rang de curiosité chimique, s'impose aujourd'hui comme un vecteur énergétique clé dans le contexte de la transition énergétique. Son histoire, riche et ancienne, témoigne d'un potentiel reconnu depuis des siècles, mais c'est seulement à l'aube du 21<sup>e</sup> siècle que sa valorisation prend une dimension stratégique. En effet, l'urgence climatique et la nécessité de se détourner des énergies fossiles rendent indispensable le développement de formes d'hydrogène bas carbone, en particulier l'hydrogène « vert » produit par électrolyse de l'eau à partir d'énergies renouvelables.

Toutefois, malgré l'attrait qu'il suscite, de nombreux défis technologiques, économiques et logistiques subsistent, notamment en ce qui concerne le rendement énergétique des électrolyseurs, le stockage sécurisé de ce gaz peu dense et la mise en place d'infrastructures de transport adaptées. Si les perspectives sont prometteuses que ce soit dans l'industrie, les transports ou le stockage d'énergie, le développement d'une filière hydrogène compétitive et durable nécessitera des investissements massifs, une volonté politique affirmée et une coordination étroite entre recherche, industrie et législateurs.

En somme, l'hydrogène ne pourra jouer un rôle structurant dans le mix énergétique de demain que s'il est produit de manière propre, utilisé de façon judicieuse et intégré dans un écosystème énergétique plus large, cohérent et résilient.

## Chapitre II

## Systeme hybride PV- PAC

## **II.1 Généralité sur les systèmes hybrides**

Dans le cadre du développement durable et de la transition énergétique, l'intégration des sources d'énergies renouvelables dans les systèmes de production électrique est devenue une priorité stratégique. Les systèmes hybrides, combinant plusieurs sources d'énergie, se présentent comme une alternative pertinente aux systèmes classiques mono-sources, notamment par leur capacité à pallier l'intermittence et l'irrégularité des ressources renouvelables telles que le solaire ou l'éolien. Malgré leur complexité accrue en termes de conception et de gestion, ces systèmes offrent une flexibilité d'exploitation, une meilleure fiabilité d'alimentation, ainsi qu'un coût de revient compétitif sur le long terme.

Cependant, leur mise en œuvre efficace repose sur plusieurs exigences fondamentales : une évaluation fine du potentiel énergétique local, un dimensionnement rigoureux des composants, et une gestion intelligente des flux d'énergie produits. Cette approche nécessite un savoir-faire technique que seule l'ingénierie avancée des systèmes énergétiques permet d'acquérir et de maîtriser.

Dans le cadre de ce mémoire, nous étudions un système hybride associant une source photovoltaïque et une pile à combustible alimentée par de l'hydrogène (supposons vert), sans recours à un dispositif de stockage par batterie. Cette configuration vise à assurer une alimentation autonome, continue et optimisée de la charge, en s'appuyant sur la complémentarité dynamique entre production solaire intermittente et génération stable via la pile à combustible. L'objectif est de tirer pleinement parti des spécificités de chaque source pour répondre aux besoins énergétiques tout en garantissant efficacité et sobriété structurelle.

## **II.2 Présentation des composants du système hybride**

### **II.2.1 Système photovoltaïque**

L'énergie solaire représente une ressource renouvelable abondante et propre, exploitée depuis plusieurs décennies pour produire de l'énergie sous différentes formes. Parmi ses déclinaisons, l'énergie solaire photovoltaïque occupe une place centrale grâce à sa capacité à convertir directement le rayonnement solaire en électricité, via le phénomène dit effet photovoltaïque. Ce processus repose sur l'utilisation de cellules semi-conductrices, généralement à base de silicium, qui génèrent un courant électrique lorsqu'elles sont exposées à la lumière.

Dans le présent travail, nous nous concentrons exclusivement sur l'énergie photovoltaïque, qui constitue l'une des sources principales du système hybride proposé. Elle est exploitée pour sa capacité à fournir une énergie électrique propre et décentralisée, particulièrement adaptée aux applications autonomes.

### **II.2.1.1 Les avantages des systèmes photovoltaïques**

- L'électricité produite à partir de l'énergie solaire est propre et non polluante.
- Les systèmes photovoltaïques offrent une grande fiabilité de fonctionnement.
- Grâce à leur compacité et à leur fonctionnement silencieux, les installations photovoltaïques conviennent parfaitement aux environnements urbains.
- Étant donné que l'ensoleillement est accessible partout, l'énergie photovoltaïque peut être exploitée aussi bien dans des villages isolés que dans des zones urbaines densément peuplées.
- La production d'électricité photovoltaïque se fait localement, au plus près du lieu de consommation, favorisant ainsi une approche décentralisée de l'approvisionnement énergétique.
- Les matériaux constitutifs des panneaux, tels que le verre et l'aluminium, sont conçus pour résister à des conditions climatiques extrêmes.
- Les panneaux solaires bénéficient d'une longue durée de vie, certains fabricants proposant des garanties allant jusqu'à 25 ans.

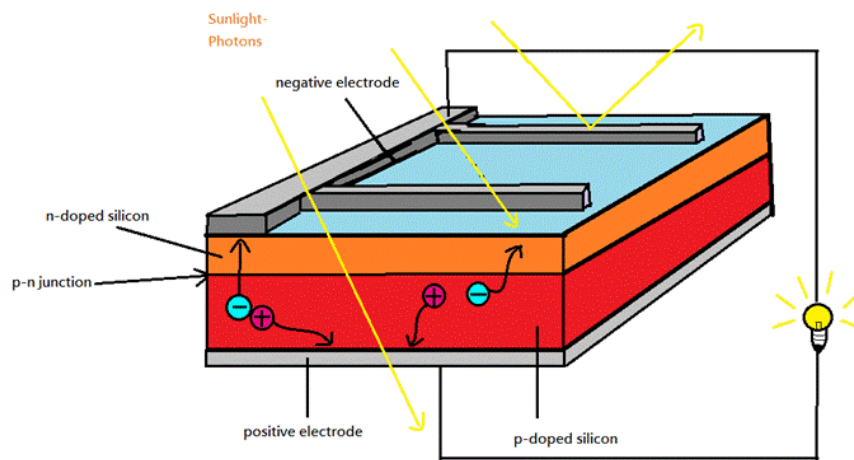
### **II.2.1.2 Les inconvénients des systèmes photovoltaïques**

- La production d'énergie est directement liée à l'ensoleillement, qui demeure par nature intermittent et variable.
- Le coût initial d'investissement reste relativement élevé.
- Le rendement de conversion de l'énergie solaire en électricité est encore limité comparé à d'autres technologies.
- L'ajout d'un système de stockage par batteries augmente considérablement le coût total de l'installation.
- La fabrication des panneaux solaires peut engendrer une certaine pollution, notamment liée à l'extraction et au traitement des matériaux utilisés.

Malgré ces limites, le secteur du photovoltaïque poursuit son essor et trouve de nombreuses applications. Par ailleurs, cette technologie est en constante évolution, et les progrès en cours laissent entrevoir une atténuation progressive de ses inconvénients, notamment en ce qui concerne les coûts de production [9, 10].

### II.2.1.3 L'effet photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont des dispositifs électroniques semi-conducteurs qui reposent sur le principe de l'effet photovoltaïque, un phénomène physique par lequel une force électromotrice est générée lorsqu'elles sont exposées à la lumière.



**Figure II.1 :** Principe de fonctionnement de la cellule PV


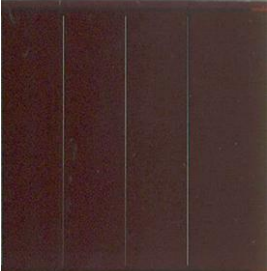
La tension produite par une cellule varie généralement entre 0,3 V et 0,7 V, selon la nature des matériaux semi-conducteurs utilisés, leur configuration, la température de fonctionnement ainsi que le vieillissement du composant.

### II.2.1.4 Différents types de cellules photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont généralement fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs tels que le silicium (Si), le sélénium (Se), le tellure de cadmium (CdTe), l'arséniure de gallium (GaAs), le sulfure de cadmium (CdS) ou encore le germanium (Ge). Parmi ces matériaux, le silicium est le plus largement utilisé en raison de sa grande abondance dans la nature. On le trouve principalement sous forme de silice, un composé chimique de formule  $\text{SiO}_2$  (dioxyde de silicium), constituant majeur des roches sédimentaires clastiques telles que les sables et les grès [9, 10].

Le Tableau II-1 illustre Les principales technologies de cellules PV :

Tableau II-1 : Types de cellules photovoltaïques

|                             |  |  |   |
|-----------------------------|--|--|---|
|                             |   |    |    |
| <b>Aspect de la cellule</b> | La cellule est bleu généralement foncé et uniforme.  | La cellule est bleu généralement clair laissant apparaître des cristaux.   | La cellule est gris très foncé ou marron.   |
| <b>Rendement</b>            | 13 à 17 %  | 11 à 15 %  | 5 à 9 %   |
| <b>Avantages</b>            | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Meilleur rendement global et par faible ensoleillement que le polycristallin</li> <li>- Meilleure durée de vie que le polycristallin</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Prix inférieur au monocrystallin</li> <li>- Faible empreinte écologique</li> <li>- Peu sensible aux variations de températures</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fonctionnent avec un éclairage faible</li> <li>- Bon marché par rapport aux autres types de cellules</li> <li>- Moins sensible aux températures élevées</li> <li>- Souple</li> </ul> |
| <b>Inconvénients</b>        | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Prix plus élevé que le polycristallin</li> <li>- Baisse du rendement à température élevée</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Rendement plus faible que le monocrystallin</li> <li>- Durée de vie un peu plus faible que le monocrystallin</li> </ul>                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Rendement faible en plein soleil</li> <li>- Durée de vie courte (+/- 10 ans) et performances diminuent sensiblement avec le temps</li> </ul>   |

### II.2.1.5 Générateur photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque constitue un générateur élémentaire capable de produire une puissance électrique relativement faible. Pour obtenir des niveaux de puissance plus élevés, les cellules sont interconnectées en série et en parallèle afin de former un module, ou panneau photovoltaïque. Cependant, un seul panneau ne suffit généralement pas à satisfaire des besoins énergétiques importants. Il est donc nécessaire de connecter plusieurs panneaux entre eux, toujours en série et/ou en parallèle, pour constituer un générateur photovoltaïque ou champ PV, capable de délivrer des puissances de l'ordre du kilowatt.

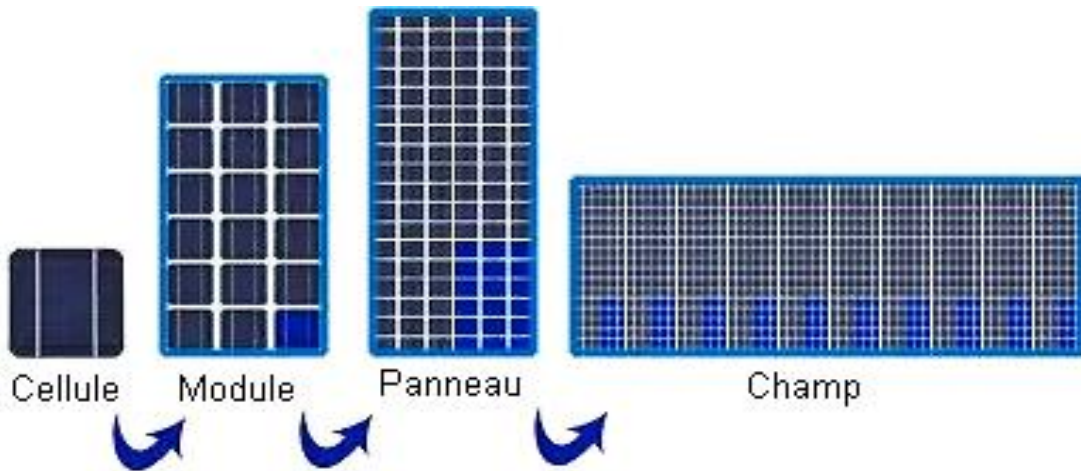


Figure II.2 : De la cellule au champ photovoltaïque

À une échelle plus vaste, plusieurs générateurs PV sont assemblés pour former une centrale photovoltaïque, dont la puissance peut atteindre plusieurs mégawatts [11].

### II.2.2 Pile à combustible

Une pile à combustible est un dispositif électrochimique qui fonctionne selon le principe inverse de l'électrolyse : une tension électrique est générée entre deux électrodes, l'une où un combustible est oxydé et l'autre où un oxydant est réduit. Découverte en 1839 par William R. Grove, cette technologie n'a connu ses premières applications pratiques qu'un siècle plus tard, freinée par le coût élevé des matériaux et la concurrence d'autres types de générateurs électriques. Ce n'est qu'en 1953 qu'un premier prototype a vu le jour, servant de base aux piles à combustible utilisées dans les missions spatiales Apollo.

Une avancée majeure est survenue en 1977 avec l'introduction des membranes polymères, donnant naissance à la pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC). Cette membrane réduit notamment la distance parcourue par certaines espèces

chimiques, ce qui améliore le rendement global du système. Le rendement électrique d'une pile à combustible se situe généralement autour de 45 %, mais il peut être nettement plus élevé si l'énergie thermique produite est également valorisée, comme dans les systèmes de cogénération [12].

### II.2.2.1 Types de piles à combustible

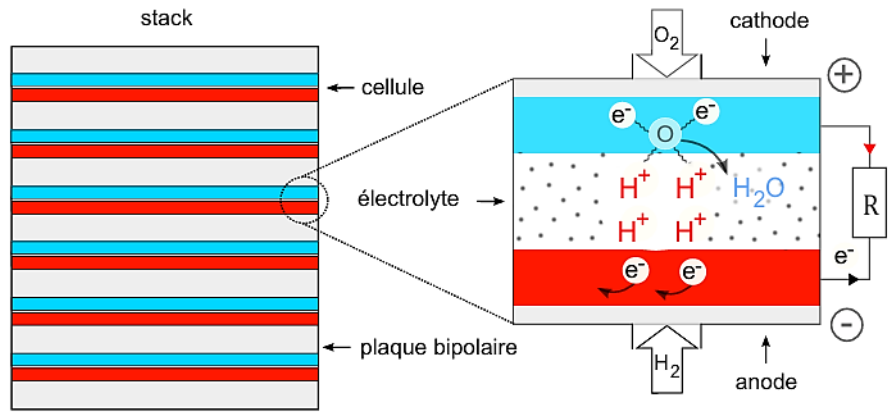
Il existe plusieurs types de piles à combustible illustrés dans le Tableau II-2 qui se distinguent par la nature de l'électrolyte, la température d'utilisation et la gamme de puissance.

**Tableau II-2** : les différentes technologies de PAC

| Type         | Gaz anode/cathode               | Electrolyte            | Température   | Puissance      | Utilisation                         |
|--------------|---------------------------------|------------------------|---------------|----------------|-------------------------------------|
| <b>PEMFC</b> | H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>  | Membrane polymère      | 60 - 220 °C   | 0.1 à 500 KW   | portable, transport, stationnaire   |
| <b>SOFC</b>  | CH <sub>4</sub> /O <sub>2</sub> | Mélange d'oxydes       | 800 - 1050 °C | Jusqu'à 100 MW | stationnaire, transport             |
| <b>DMFC</b>  | Méthanol/O <sub>2</sub>         | Membrane polymère      | 90 - 120 °C   | 1 mW à 100 KW  | portable (téléphonie, informatique) |
| <b>AFC</b>   | H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>  | Hydroxyde de potassium | 60 - 90 °C    | 10 à 100 KW    | stationnaire, transport             |
| <b>PAFC</b>  | H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>  | Acide phosphorique     | 200 °C        | Jusqu'à 10 MW  | stationnaire                        |
| <b>MCFC</b>  | CH <sub>4</sub> /O <sub>2</sub> | Mélange de carbonates  | 650 °C        | Jusqu'à 100 MW | stationnaire                        |

### II.2.2.2 Principes de fonctionnement

Une pile à combustible est constituée de deux électrodes poreuses l'anode (électrode négative) et la cathode (électrode positive) séparées par un électrolyte, qui assure le transport des ions entre les électrodes. Pour augmenter la puissance fournie, plusieurs cellules élémentaires peuvent être empilées les unes sur les autres, formant un ensemble appelé « Stack ». Chaque cellule est alors séparée par des plaques bipolaires qui assurent à la fois la conduction électrique et la distribution des réactifs.

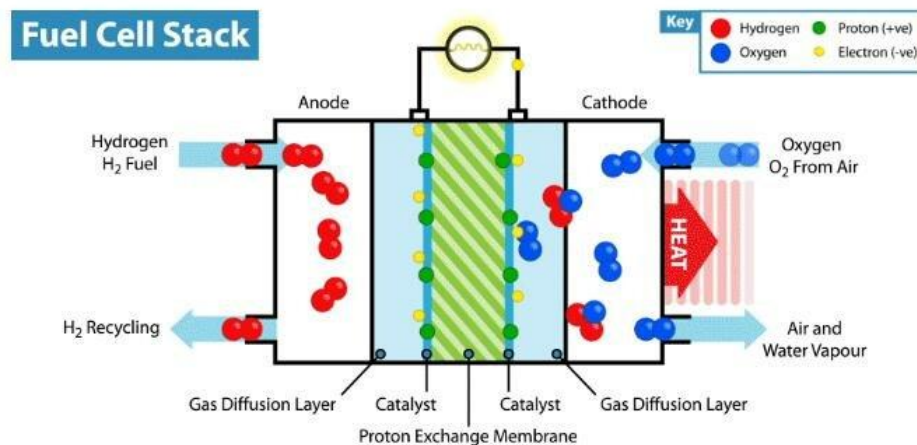


**Figure II.3 :** Schéma de principe d'une pile à combustible

Dans une cellule de type PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell), qui constitue l'une des sources d'énergie de notre système hybride, chaque électrode est composée de deux couches : une couche de diffusion de gaz (GDL, Gas Diffusion Layer) et une couche catalytique. La GDL assure une distribution homogène des gaz réactifs et facilite le transfert des électrons vers les catalyseurs. La couche catalytique, située entre la GDL et l'électrolyte (membrane polymère), est le siège des réactions électrochimiques d'oxydoréduction.

La membrane polymère, qui joue le rôle d'électrolyte, doit être imperméable aux gaz, conductrice des protons  $H^+$  et isolante pour les électrons. En plus de ses propriétés de conduction ionique, elle doit présenter une bonne stabilité thermique et mécanique.

L'ensemble formé par la membrane et les électrodes, appelé Assemblage Membrane-Électrodes (AME), constitue l'unité de base d'une pile à combustible. Les plaques bipolaires, disposées entre chaque AME, assurent la distribution des gaz réactifs, l'évacuation des produits de réaction, et permettent le transfert des électrons entre le circuit externe et la GDL [13].

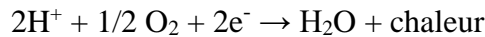


**Figure II.4 :** Principe de fonctionnement d'une PEMFC

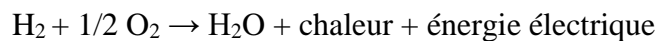
À l'anode, l'hydrogène ( $H_2$ ), acheminé par les canaux des plaques bipolaires, traverse la couche de diffusion des gaz pour atteindre la couche catalytique, située au contact de l'électrolyte. C'est à cet endroit qu'a lieu la réaction d'oxydation suivante :



A la cathode, l'oxygène nécessaire à la réaction exothermique est apporté par la GDL :

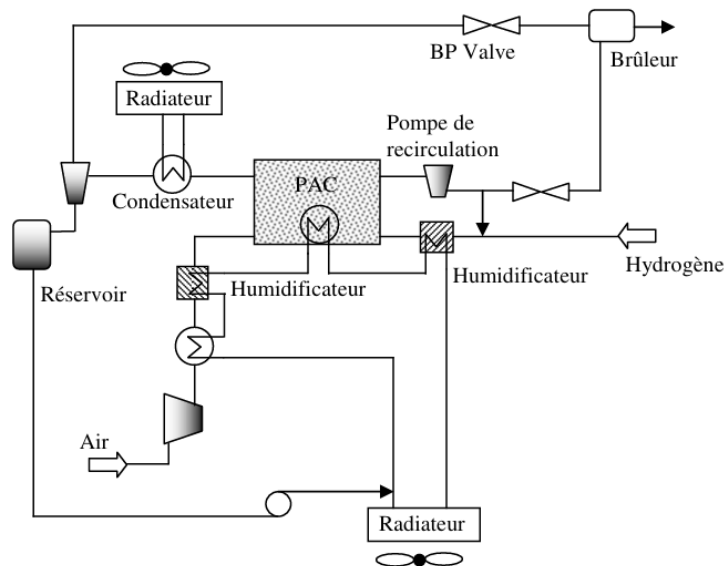


La réaction d'oxydoréduction totale s'écrit :



### II.2.2.3 Système PAC et auxiliaires

Le fonctionnement optimal d'une pile à combustible repose sur l'intégration d'un ensemble d'auxiliaires qui, combinés à la pile, forment un système complet. Un modèle représentatif de ce système est illustré dans la Figure II.5 : Système PAC et auxiliaires. La majorité des systèmes à pile à combustible adoptent une configuration similaire, intégrant des composants auxiliaires comparables.



**Figure II.5 :** Système PAC et auxiliaires

Ce système peut être divisé en quatre sous-systèmes principaux : la pile elle-même, le circuit d'alimentation en hydrogène, le circuit d'alimentation en air, et enfin le sous-système de gestion de l'eau et de la température.

### **II.2.2.3.1 Circuit d'alimentation en hydrogène**

Dans une pile fonctionnant à l'hydrogène direct, un circuit simple assure l'alimentation en hydrogène. Celui-ci est généralement stocké sous forme gazeuse dans des réservoirs à haute pression, allant de 300 à 700 bars. Un détendeur mécanique est utilisé pour abaisser cette pression à une valeur adaptée au fonctionnement de la pile, typiquement comprise entre 1 et 3 bars.

L'hydrogène est ensuite recyclé au sein du compartiment anodique à l'aide d'une pompe, afin de maintenir un flux homogène. Lorsque l'anode fonctionne en circuit fermé, une purge contrôlée par une valve est périodiquement nécessaire pour éviter l'accumulation d'azote, susceptible de traverser la membrane depuis la cathode.

L'hydrogène résiduel, non utilisé dans la réaction électrochimique, est généralement brûlé dans un petit brûleur catalytique. Enfin, pour préserver les performances de la pile, l'hydrogène peut être humidifié à l'aide d'un système à membrane utilisant de l'eau dé-ionisée.

### **II.2.2.3.2 Circuit d'alimentation en air**

L'approvisionnement en air de la cathode est assuré par un compresseur, accompagné d'un système de conditionnement externe permettant de réguler la température et l'humidité de l'air. La pression d'entrée dans la pile est généralement contrôlée par une vanne commandée. L'air en sortie de la pile sert, quant à lui, à alimenter le brûleur catalytique en tant qu'agent oxydant.

Avant d'atteindre la pile, l'air comprimé est porté à la température de fonctionnement grâce à un échangeur de chaleur utilisant l'eau du circuit de refroidissement. Son humidification est assurée, à l'instar de celle de l'hydrogène, par un humidificateur à membrane.

Les compresseurs employés dans ce type de système sont généralement de type volumétrique. Ce type de compresseur est particulièrement adapté aux faibles débits de fluide, pouvant être très variables, tout en assurant des rapports de pression élevés, ce qui correspond aux exigences des piles à combustible.

### II.2.2.3.3 Sous-système de gestion d'eau et de température

Bien que la pile à combustible soit l'un des dispositifs de conversion d'énergie les plus efficaces à partir d'un combustible, elle génère néanmoins une quantité significative de chaleur au cours de la réaction électrochimique. Sa température de fonctionnement, généralement comprise entre 60 et 80 °C, reste relativement basse par rapport à celle des systèmes thermiques conventionnels. Cela rend indispensable l'intégration d'un système de refroidissement performant.

Les échangeurs de chaleur utilisés remplissent plusieurs fonctions simultanées : ils permettent de réguler la température de la pile, de conditionner l'air comprimé à la température de fonctionnement avant son introduction dans la cathode, et de condenser la vapeur d'eau en vue de son recyclage pour l'humidification des gaz réactifs.

La gestion de l'eau est un aspect crucial dans le bon fonctionnement d'un système à pile à combustible. Elle vise à maintenir une humidification constante de la membrane par l'humidification contrôlée des gaz d'entrée. Cette eau est généralement récupérée à la sortie de la cathode. En fonction des conditions de température et de pression, un condensateur peut être placé en sortie de pile pour faciliter cette récupération, comme illustré dans la Figure II.5 [14].

### **II.3 Conclusion**

Le système hybride combinant l'énergie photovoltaïque et la pile à combustible constitue une solution innovante et prometteuse pour répondre aux enjeux de la transition énergétique. L'association de ces deux technologies permet de pallier les limites de l'intermittence solaire grâce à la continuité de production assurée par la pile à combustible alimentée en hydrogène.

Tout au long de ce chapitre, nous avons mis en évidence les principes de fonctionnement, les avantages, ainsi que les contraintes techniques associées à chacun des composants du système. Le système PAC, en particulier, s'appuie sur des auxiliaires essentiels : alimentation en gaz, gestion thermique et humidification, qui influencent fortement ses performances globales. Ainsi, le rendement d'un tel système ne dépend pas uniquement des caractéristiques intrinsèques des cellules, mais aussi de l'efficacité énergétique de ses périphériques.

Ce type de configuration, sans recours à un stockage par batterie, ouvre la voie à des systèmes énergétiques autonomes, fiables et respectueux de l'environnement. Néanmoins, son intégration optimale nécessite un dimensionnement rigoureux, une gestion intelligente des flux d'énergie, ainsi qu'un suivi précis des conditions de fonctionnement. Ces éléments seront approfondis dans le chapitre suivant, consacré à la modélisation et à l'optimisation du système hybride.

# Chapitre III

# Modélisation du système hybride

### III.1 Introduction

La modélisation représente une étape essentielle dans le développement d'un système énergétique hybride, car elle permet de traduire les comportements physiques des composants en équations mathématiques exploitables. Dans le cadre de ce mémoire, il s'agit de modéliser un système hybride combinant une source photovoltaïque et une pile à combustible alimentée en hydrogène vert, en vue d'assurer l'alimentation autonome d'une charge.

Ce chapitre se concentre sur la représentation des principaux sous-systèmes : le générateur photovoltaïque, la pile à combustible de type PEMFC, et la stratégie de gestion énergétique assurant la complémentarité entre les sources. Chaque composant est modélisé selon ses caractéristiques électriques et thermiques, avec une prise en compte des paramètres environnementaux influents tels que l'irradiation solaire et la température.

### III.2 Modélisation de la cellule photovoltaïque

L'élément de base d'un système photovoltaïque est la cellule photovoltaïque. La cellule photovoltaïque (dispositif semi-conducteur) est un composant optoélectronique qui transforme directement la lumière du soleil en électricité.

Une cellule photovoltaïque est modélisée de manière simple par une source idéale de courant qui produit un courant  $I_{ph}$  proportionnelle à la puissance lumineuse, en parallèle avec une diode qui correspond à la jonction p-n.

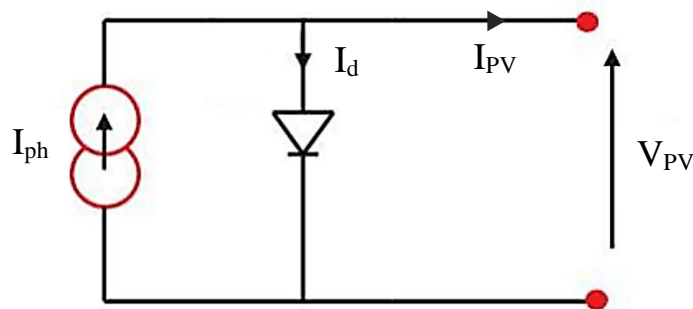


Figure III.1 : Modèle d'une cellule idéale

Le circuit représenté ci-dessus est régi par la relation suivante :

$$I_{PV} = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV_d}{nKT}\right) - 1 \right] \quad (III-1)$$

Avec :

- $I_0$  le courant de saturation inverse ou courant de saturation dans l'obscurité de la diode à la température  $T$ ,

$$I_0 = I_{0(T1)} \left(\frac{T}{T_1}\right)^{3/n} \exp\left[\frac{-qE_g}{nK} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_1}\right)\right] \quad (III-2)$$

$$I_{0(T1)} = I_{sc(T1)} \exp\left[\frac{-qV_{oc(T1)}}{nKT_1} + 1\right] \quad (III-3)$$

Où :  $E_g$  la tension de la bande interdite « Band gap » en V,  $I_{sc(T1)}$  et  $V_{oc(T1)}$  respectivement le courant de court-circuit et la tension en circuit ouvert à la température  $T_1$  de la cellule.

- $q$  la charge élémentaire d'un électron  $1,6 \cdot 10^{-19}$  C
- $V_d$  la tension à travers la diode
- $n$  le facteur d'idéalité de la diode qui varie entre 1 et 2
- $K$  la constante de Boltzmann  $1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K
- $T$  la température absolue en K

$$\frac{KT}{q} = V_T \text{ (Tension thermique)} \quad (III-4)$$

Ce modèle reste théorique et ne prend pas compte du comportement d'une cellule photovoltaïque dans des conditions réelles, où on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuites. On modélise donc cette perte de tension par une résistance en série  $R_s$ , et les courants de fuite par une résistance en parallèle  $R_{sh}$  (voire la Figure III.2) [15].

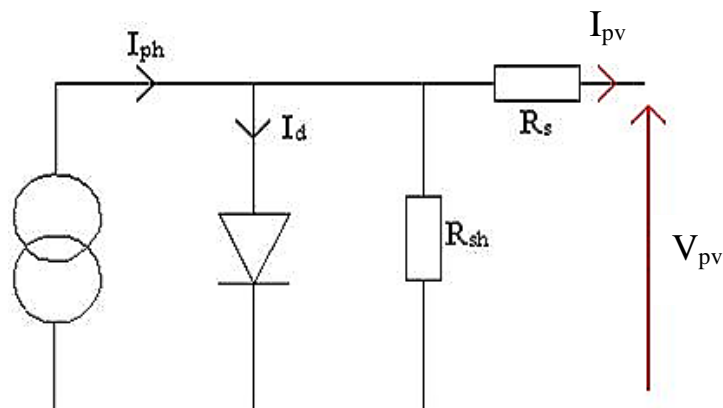


Figure III.2 : Modèle d'une cellule réelle

En appliquant la loi de Kirchhoff, le courant  $I_{pv}$  est donné par :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (III-5)$$

Avec :

- $I_d$  est le courant de la diode :

$$I_d = I_0 \left[ \exp \left( \frac{V_{PV} + R_S I_{PV}}{n V_T} \right) - 1 \right] \quad (III-6)$$

Où  $I_{pv}$  et  $V_{pv}$  sont respectivement le courant et la tension de la cellule.

- $I_{sh}$  est le courant traversant la résistance parallèle  $R_{sh}$  :

$$I_{sh} = \frac{V_{PV} + R_S I_{PV}}{R_{sh}} \quad (III-7)$$

Lorsqu'on remplace  $I_d$  et  $I_{sh}$  par leurs équations on obtient :

$$I_{PV} = I_{ph} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{V_{PV} + R_S I_{PV}}{n V_T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{PV} + R_S I_{PV}}{R_{sh}} \quad (III-8)$$

Le courant  $I_{ph}$  dépend du rayonnement solaire et de la température de la cellule et peut être obtenu à partir de l'équation suivante :

$$I_{ph} = I_{ph(T_1)} [1 + K_0 (T - T_1)] \quad (III-9)$$

Avec :

$$I_{ph(T_1)} = \frac{G \times I_{sc(T_1)}}{G_{nom}} \quad (III-10)$$

$$K_0 = \frac{I_{sc(T_2)} - I_{sc(T_1)}}{I_{sc(T_1)} (T_2 - T_1)} \quad (III-11)$$

- $G$  l'irradiation en kW/m<sup>2</sup>
- $G_{nom}$  l'irradiation nominale de la cellule photovoltaïque en KW/m<sup>2</sup>
- $I_{sc(T_1)}$  est le courant de court-circuit à la première température de référence en A
- $I_{sc(T_2)}$  est le courant de court-circuit à la deuxième température de référence en A
- $T_1$  et  $T_2$  des températures de référence en K [16].

### III.2.1 Le courant de court-circuit de la cellule PV

Le courant de court-circuit, noté  $I_{sc}$ , représente l'intensité maximale délivrée par la cellule photovoltaïque lorsque ses bornes sont en court-circuit, c'est-à-dire lorsque la tension de sortie est nulle ( $V=0$ ). Ce paramètre est crucial pour caractériser la performance électrique d'une cellule, notamment dans des conditions standards d'irradiation et de température.

En appliquant les conditions de court-circuit, soit  $I_{pv} = I_{sc}$ ,  $V = 0$ , et en supposant que  $R_s \ll R_{sh}$ , l'équation globale du modèle permet de déterminer  $I_{sc}$  s'écrit :

$$I_{sc} = I_{ph} = I_{ph(T1)}[1 + K_0(T - T_1)] \quad (III-12)$$

### III.2.2 La tension du circuit ouvert de la cellule PV

La tension à vide, notée  $V_{oc}$ , représente la tension maximale délivrée par une cellule photovoltaïque lorsque le circuit est ouvert, c'est-à-dire en l'absence de courant ( $I=0$ ). Cette grandeur correspond à la différence de potentiel entre les bornes de la cellule lorsque celle-ci est soumise à un éclairage, mais aucune charge n'est connectée. Le paramètre  $V_{oc}$  est essentiel pour évaluer les performances électriques d'une cellule, en particulier dans des conditions standards d'irradiation et de température.

En appliquant les conditions de circuit ouvert, soit  $I_{pv} = 0$ , et en considérant que  $R_{sh}$  est énorme l'équation du modèle permet d'exprimer la tension à vide s'écrit :

$$V_{oc} = n V_T \times \ln \left( \frac{I_{ph} + I_0}{I_0} \right) \quad (III-13)$$

### III.2.3 Caractéristique électrique de la cellule PV

Après avoir défini les grandeurs caractéristiques telles que le courant de court-circuit  $I_{sc}$  et la tension à vide  $V_{oc}$ , il est désormais pertinent d'analyser le comportement global de la cellule photovoltaïque à travers ses courbes caractéristiques I-V (courant-tension) et P-V (puissance-tension), qui permettent d'évaluer ses performances électriques en conditions réelles de fonctionnement.

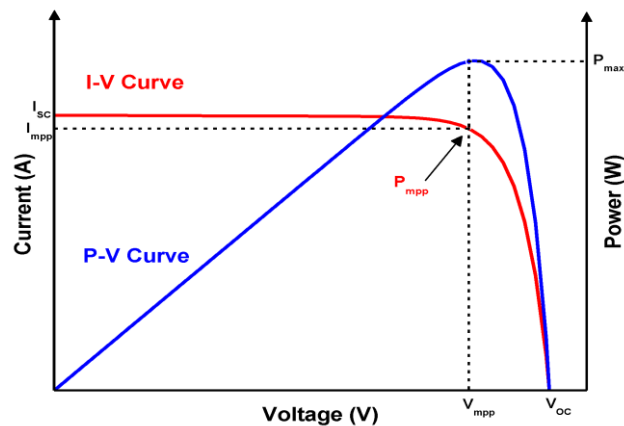


Figure III.3 : Caractéristiques de la courbe des cellules PV

### III.2.4 Effet de la température et de l'irradiation sur la performance de la cellule PV

Pour étudier l'influence de la température ( $T$ ) et de l'irradiation ( $G$ ) sur les caractéristiques du panneau on fait varier l'un et on fixe l'autre à sa valeur de référence.

#### III.2.4.1 Effet de la température

La température a une influence significative sur les performances de la cellule photovoltaïque, comme observé dans la Figure III.4 : une élévation de la température entraîne une diminution progressive de la tension à vide  $V_{oc}$ , tandis que le courant de court-circuit  $I_{sc}$  augmente légèrement, ce qui conduit à une baisse globale de la puissance fournie par la cellule.

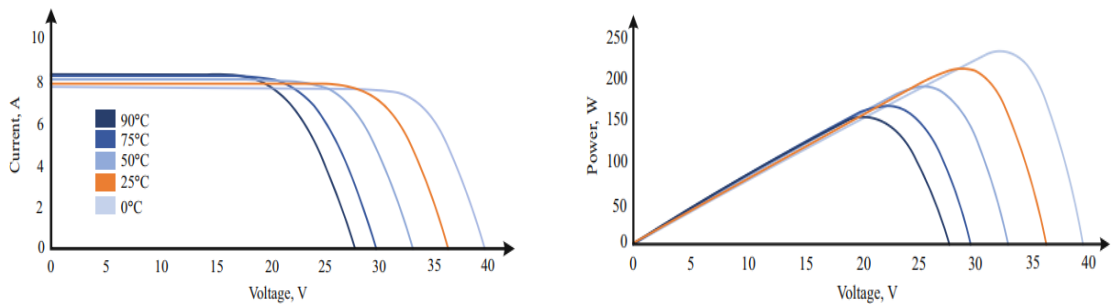


Figure III.4 : Effet de la température sur I-V et P-V

#### III.2.4.2 Effet de l'irradiation

L'irradiation solaire a une influence directe sur le courant généré par la cellule photovoltaïque, dans la Figure III.4 on observe : une augmentation de l'irradiation entraîne une élévation proportionnelle du courant de court-circuit  $I_{sc}$ , tandis que la tension à vide  $V_{oc}$  n'augmente que légèrement, ce qui se traduit globalement par une hausse de la puissance de sortie.

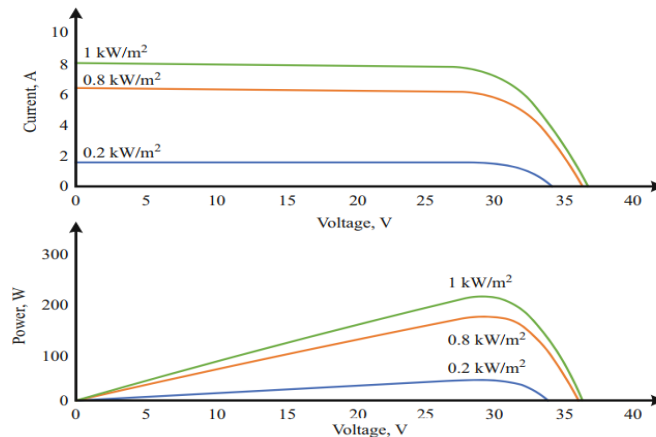


Figure III.5 : Effet de l'irradiation sur I-V et P-V

### III.2.5 Association des cellules pour former un générateur PV

Un générateur photovoltaïque (GPV) est constitué par l'association de plusieurs cellules photovoltaïques selon des configurations en série, en parallèle, ou une combinaison des deux. Lorsqu'elles sont connectées en série, les tensions des cellules s'additionnent, ce qui permet d'augmenter la tension de sortie du générateur (voir la Figure III.6). À l'inverse, une connexion en parallèle permet d'additionner les courants de chaque cellule, augmentant ainsi le courant total (voir la Figure III.7).

En pratique, on adopte fréquemment une configuration série-parallèle afin d'ajuster à la fois la tension et le courant selon les besoins du système. Dans ce cas, les cellules sont d'abord regroupées en séries pour former des modules, puis ces modules sont connectés entre eux en parallèle (voir la Figure III.8).

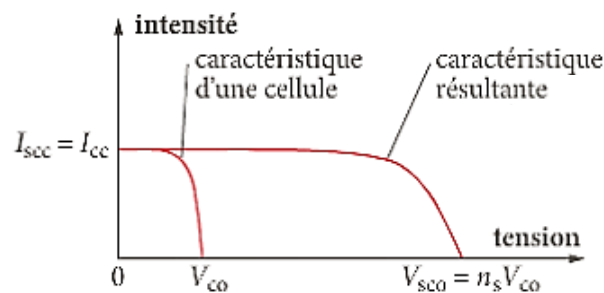


Figure III.6 : Impact de l'association en série sur la courbe I-V

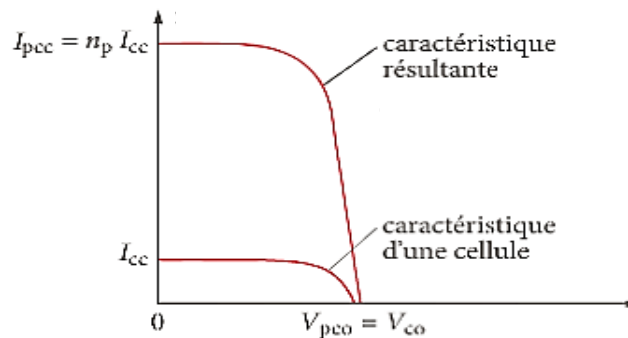


Figure III.7 : Impact de l'association en parallèle sur la courbe I-V

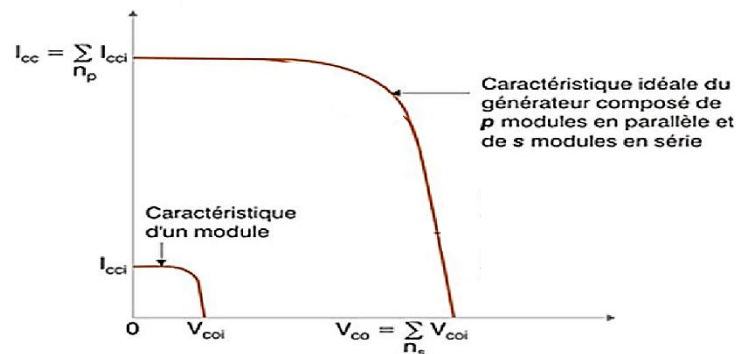


Figure III.8 : Caractéristique I-V d'un générateur PV série/parallèle

### III.2.6 Suivi du point de puissance maximale (MPPT)

Afin d'exploiter au mieux l'énergie produite par une cellule photovoltaïque, il est essentiel de faire fonctionner le système au point de puissance maximale (MPP), là où le produit du courant et de la tension est le plus élevé. Toutefois, ce point varie en fonction des conditions d'ensoleillement et de température, rendant son suivi en temps réel indispensable pour maintenir un rendement optimal. C'est dans ce cadre que s'inscrit le rôle des algorithmes MPPT. Parmi les méthodes les plus couramment utilisées pour le suivi du point de puissance maximale, on distingue principalement la méthode de Perturbation et Observation (P&O) et celle de l'Incrémental Conductance, toutes deux largement adoptées pour leur simplicité et leur efficacité.

#### III.2.6.1 Méthode de P&O

La méthode utilisée pour contrôler le MPPT est la méthode de perturbation et d'observation. Comme son nom indique la méthode de P&O, fonctionne par la perturbation du système soit par l'augmentation ou la diminution de la tension de fonctionnement et d'observer son impact sur la puissance de sortie du panneau. La Figure III.9 donne l'organigramme de cet algorithme.

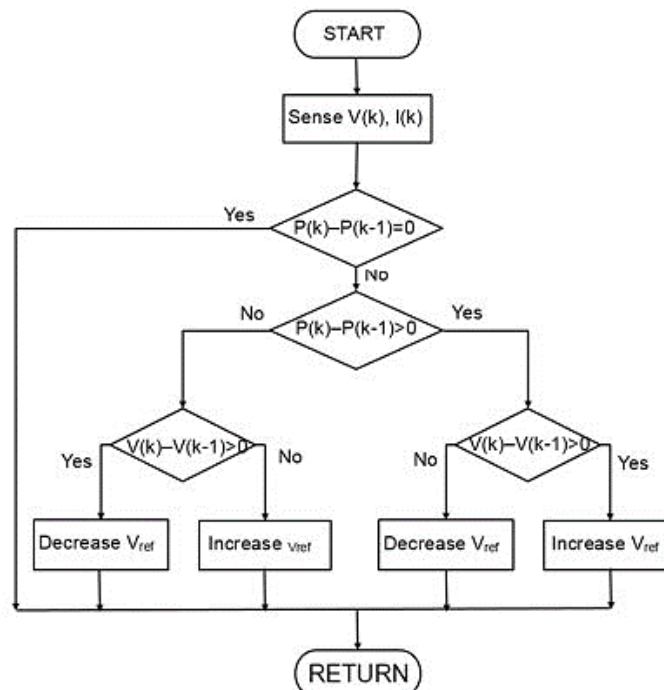


Figure III.9 : l'organigramme de la méthode P&O

Cet algorithme est conçu de sorte qu'il fonctionne sur un ordinateur et donc à chaque cycle de l'algorithme,  $V$  et  $I$  sont mesurés pour calculer  $P(k)$ . Cette valeur  $P(k)$  est comparée avec celle de  $P(k-1)$ . Si la puissance de sortie a augmenté depuis la dernière

mesure, la perturbation de la tension de sortie continuera dans la même direction que celle qui a été prise au dernier cycle. Si la puissance de sortie a diminué depuis la dernière mesure, la tension  $V$  du GPV est perturbée dans la direction opposée à celle de l'itération précédente.

### III.2.6.2 Méthode Incremental Conductance

Cette technique repose sur l'analyse de la variation de la conductance du générateur photovoltaïque, ainsi que sur la connaissance de la position du point de fonctionnement par rapport au point de puissance maximale (PPM) [17]. La conductance du module photovoltaïque est alors définie comme le rapport entre le courant et la tension du GPV, selon la relation suivante :

L'évolution de la puissance du module photovoltaïque ( $P_{pv}$ ) en fonction de la tension ( $V_{pv}$ ) permet de déterminer la position du point de fonctionnement par rapport au PPM. Lorsque la dérivée de la puissance par rapport à la tension est nulle, le système se trouve exactement au PPM. Si cette dérivée est positive, le point de fonctionnement est situé à gauche du maximum, tandis qu'une dérivée négative indique une position à droite de ce point.

Le lien entre la conductance et la dérivée de la puissance  $dP_{pv}/dV_{pv}$  peut être décrit par l'équation (III-14) :

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{d(I_{pv} \times V_{pv})}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (III-14)$$

Ainsi, il est possible d'établir de nouvelles conditions basées sur la variation de la conductance.

- Si  $\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} > -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$  le point de fonctionnement est à gauche du PPM
- Si  $\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$  le point de fonctionnement est sur le PPM
- Si  $\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} < -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$  le point de fonctionnement est à droite du PPM

Le point de puissance maximale peut alors être localisé en effectuant des comparaisons à chaque instant de la valeur de la conductance comme l'illustre la Figure III.10.

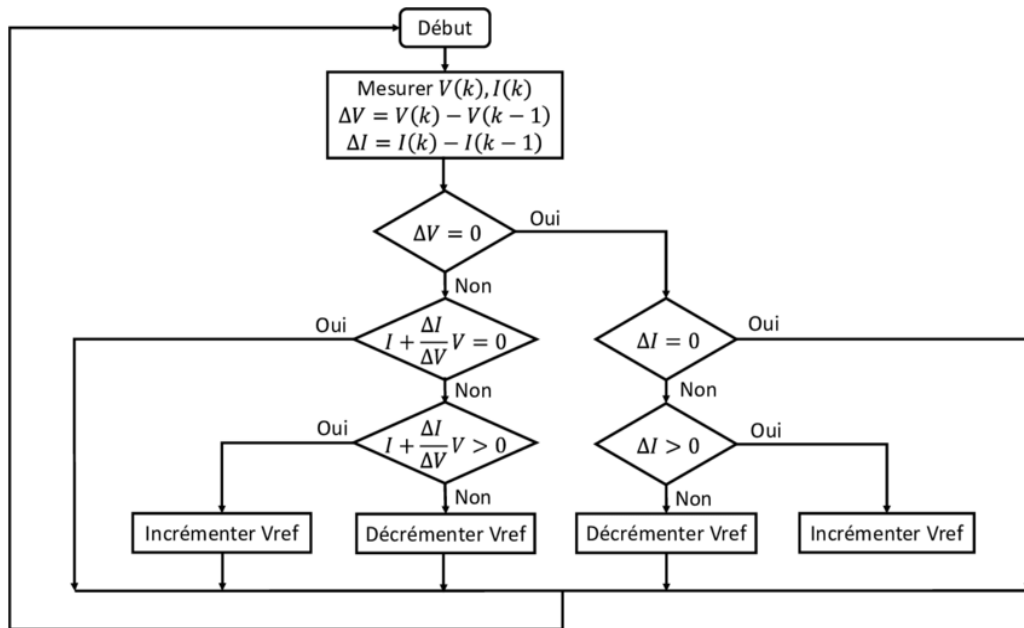


Figure III.10 : l'organigramme de la méthode Incrémentale conductance

Une fois le PPM atteint, le point de fonctionnement peut être maintenu sur cette position jusqu'à la détection d'une variation de  $\Delta I_{pv}$ . Cela indique alors un changement de conditions climatiques, donc un nouveau PPM à rechercher. Pour cela l'algorithme incrémente ou décrémente la valeur de  $V_{ref}$  jusqu'à atteindre le PPM [18].

### III.2.7 Convertisseur DC/DC

Dans les applications réelles, la résistance de charge n'est pas nécessairement égale à la résistance optimale permettant d'extraire la puissance maximale d'un module photovoltaïque. De plus, même si cette condition est initialement satisfaite, les variations continues de l'irradiance solaire et de la température ambiante modifient le point de fonctionnement du générateur PV, l'éloignant ainsi du point de puissance maximale (MPPT). Pour garantir que le système fonctionne en permanence à proximité de ce point optimal, une stratégie de suivi du MPPT est indispensable. Le principe repose sur l'adaptation dynamique de l'impédance vue par le générateur PV, afin qu'elle corresponde à sa résistance optimale en toutes circonstances. Cette adaptation est assurée par un convertisseur DC/DC, contrôlé par un algorithme MPPT, qui ajuste les conditions de charge pour maintenir le générateur photovoltaïque à son rendement maximal, indépendamment des fluctuations de l'environnement ou de la charge connectée.

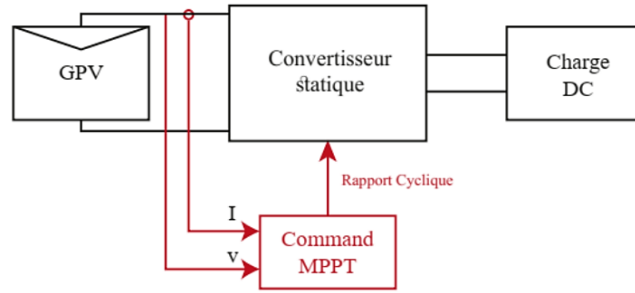


Figure III.11 : Chaîne de conversion photovoltaïque

Dans le cadre de ce travail, l'adaptation d'impédance nécessaire au suivi du point de puissance maximale est assurée par un convertisseur DC/DC de type Boost, utilisé à la fois pour le générateur photovoltaïque et pour la pile à combustible. Ce choix s'explique par la capacité de ce convertisseur à élever la tension de sortie tout en assurant une régulation efficace du point de fonctionnement, quelles que soient les variations de la source d'énergie.

### III.2.7.1 Convertisseur DC/DC Boost

Le convertisseur DC/DC Boost est alimenté par une source de courant continu, généralement représentée par une source de tension en série avec une inductance. À la sortie, la charge est de type tension continue, modélisée par un condensateur en parallèle avec une charge résistive.

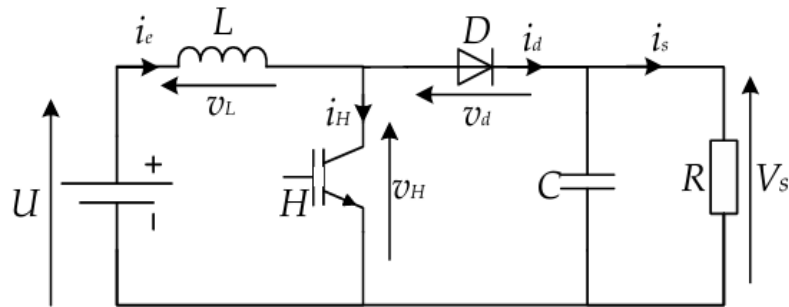


Figure III.12 : Schéma électrique d'un convertisseur DC/DC Boost

L'interrupteur H est remplacé dans la pratique par un transistor de commutation, car le courant reste toujours positif et les transitions doivent être pilotées activement, aussi bien à l'ouverture qu'à la fermeture.

#### III.2.7.1.1 Fonctionnement

Pendant la première phase du cycle de fonctionnement, allant de 0 à  $\alpha T$ , l'interrupteur commandé est fermé (conducteur). Durant cette période, la source est isolée de la charge et la diode reste bloquée.

Dans la seconde phase, de  $\alpha T$  à  $T$ , l'interrupteur s'ouvre, rendant la diode conductrice. La source est alors connectée à la charge.

### III.2.7.1.2 Analyse du fonctionnement

- $0 \leq t \leq \alpha T$  : H est fermé et D est bloquée.

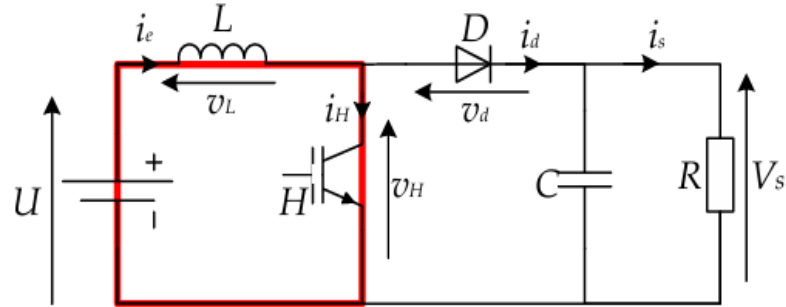


Figure III.13 : Schéma électrique d'un convertisseur DC/DC Boost fermé

On trouve que :  $v_H = 0$ ,  $i_d = 0$ ,  $i_H = 0$  et  $v_d = -V_s$

L'intensité du courant  $i_e$  vérifie l'équation suivante :

$$L \frac{di_e}{dt} - U = 0 \quad (III-15)$$

La solution est donnée par :

$$i_e = \frac{U}{L} t + A_1 \quad (III-16)$$

Avec :  $A_1$  c'est une constante positive à déterminer.

En régime permanent et en supposant que à  $t = 0$ ,  $i_e(0) = I_{emin} = A_1$

L'expression du courant de charge devient :

$$i_e = \frac{U}{L} t + I_{emin} \quad (III-17)$$

- $\alpha T \leq t \leq T$  : H est bloqué et D est passante.

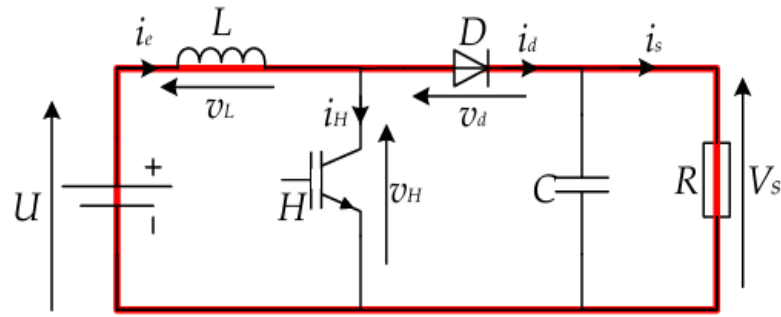


Figure III.14 : Schéma électrique d'un convertisseur DC/DC Boost ouvert

On observe que :  $v_H = V_s$ ,  $i_d = i_s = i_e$ ,  $i_H = 0$  et  $v_d = 0$

L'intensité du courant  $i_e$  vérifie l'équation suivante :

$$L \frac{di_e}{dt} = U - V_s \quad (III-18)$$

La solution de cette équation différentielle est donnée par :

$$i_e = \frac{U - V_s}{L} t + A_2 \quad (III-19)$$

### III.2.7.1.3 Valeur moyenne

La valeur moyenne de la tension aux bornes de l'interrupteur H est donnée par :

$$V_{Hmoy} = \frac{1}{T} \int_0^T v_H(t) dt = \frac{1}{T} \left[ \int_0^{\alpha T} 0 dt + \int_{\alpha T}^T V_s dt \right] \quad (III-20)$$

$$V_{Hmoy} = (1 - \alpha) V_s \quad (III-21)$$

D'autre côté, on a :

$$L \frac{di_e}{dt} + v_H = U \quad (III-22)$$

Donc :

$$\left( L \frac{di_e}{dt} \right)_{moy} + v_{Hmoy} = U \quad (III-23)$$

Comme la valeur moyenne de la tension aux bornes l'inductance est nulle, alors :

$$V_s = \frac{U}{1 - \alpha} \quad (III-24)$$

### III.2.7.2 Principe général de fonctionnement des onduleurs monophasés

Le principe de fonctionnement d'un onduleur repose sur l'électronique de commutation, qui permet de générer une forme d'onde de tension alternative à partir d'une tension continue, comme illustré dans le schéma.

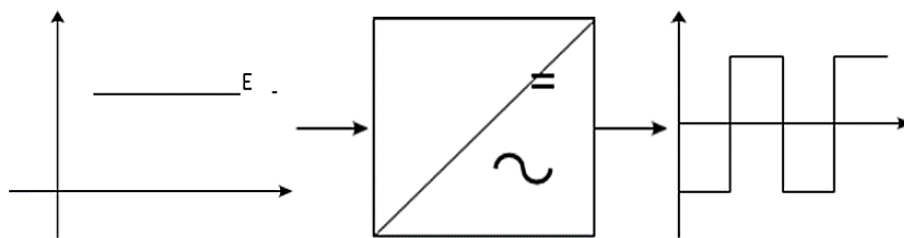


Figure III.15 : Schéma de conversion DC-AC

L'utilisation directe d'une paire d'interrupteurs de base nécessite un ajustement de la fréquence et de la durée des connexions entre la source et la sortie. Cela conduit à une approche temporelle, impliquant le recours aux techniques de modulation de largeur d'impulsion (PWM). Le contrôle de l'amplitude peut être réalisé soit de manière continue, en créant une source ajustable (ce qui implique l'ajout d'un autre étage de conversion), soit de façon discrète, en disposant d'un nombre suffisant de sources. Lorsque les interrupteurs S1 et S4 sont fermés (On) et que S2 et S3 sont ouverts (Off), pendant l'intervalle de temps  $0 < t < T/2$ , on obtient une demi-alternance positive  $U(t) = V_{DC}$ , comme illustré dans la Figure III.16 [19].

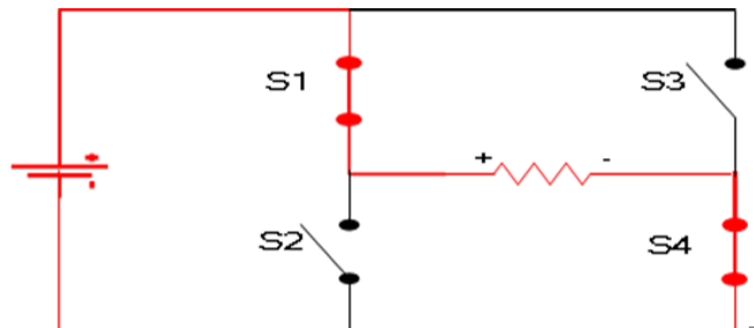


Figure III.16 : Fonctionnement de l'onduleur pendant la première demi-alternance

Lorsque les interrupteurs S1 et S4 sont ouverts (Off) et que S2 et S3 sont fermés (On), pendant l'intervalle de temps  $T/2 < t < T$ , une demi-alternance négative est produite, avec  $U(t) = -V_{DC}$ , comme illustré dans la Figure III.17.

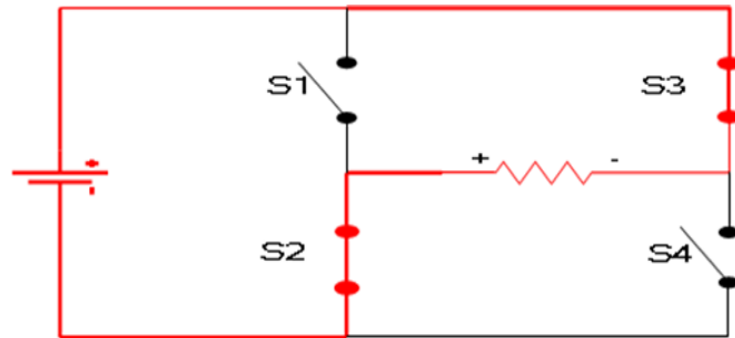


Figure III.17 : Fonctionnement de l'onduleur pendant la deuxième demi-alternance

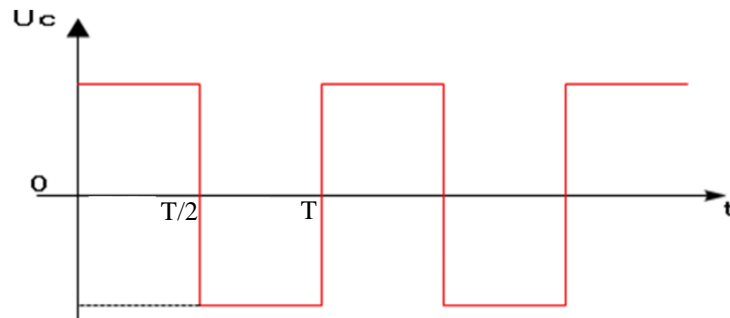


Figure III.18 : Signal complet de l'onduleur

### III.3 Modélisation de la pile à combustible

Après avoir présenté dans le chapitre précédent les principes de fonctionnement et les caractéristiques technologiques des piles à combustible de type PEMFC, cette section se concentre sur leur modélisation électrique dans le but d'intégrer leur comportement au sein du système hybride. L'objectif est de représenter les phénomènes électrochimiques dominants, tels que la génération de tension, les pertes de polarisation (activation, ohmiques et concentration), ainsi que la consommation d'hydrogène, à l'aide de modèles mathématiques simplifiés mais représentatifs. Cette modélisation permettra d'analyser les performances dynamiques de la PAC en interaction avec les autres sources du système hybride, et de simuler son fonctionnement dans des conditions variables de charge et d'environnement.

### III.3.1 Tension réversible d'une PAC

La tension délivrée par une pile à combustible est fonction de grandeurs thermodynamiques fondamentales, dont les principales sont rappelées ci-après.

#### III.3.1.1 Energie interne

Selon le premier principe de la thermodynamique, la variation de l'énergie interne  $U$  d'un système correspond à la somme de la chaleur  $Q$  reçue et du travail  $W$  fourni. Pour une transformation élémentaire, cette relation s'exprime par :

$$\delta U = \delta Q + \delta W \quad (III-25)$$

Si l'on considère en plus une transformation réversible impliquant uniquement des forces de pression, les échanges de chaleur et de travail s'écrivent respectivement  $\delta Q = TdS$  et  $\delta W = -pdV$ . Dans ce cas, l'équation (III-25) se transforme en :

$$dU = TdS - pdV \quad (III-26)$$

Où  $S$  désigne l'entropie, c'est une fonction d'état qui représente le degré de désordre microscopique d'un système. Selon le second principe de la thermodynamique, l'entropie d'un système isolé ne peut jamais diminuer : elle augmente lors d'une transformation irréversible ou reste constante si la transformation est réversible.

#### III.3.1.2 Energie de Gibbs

L'énergie libre de Gibbs  $G$ , également appelée enthalpie libre, est une fonction d'état définie par la relation thermodynamique suivante :

$$G = H - TS \quad (III-27)$$

Dans le cas d'une réaction réversible à température constante, la variation de l'enthalpie libre  $\Delta_r G$ , aussi appelée enthalpie libre de réaction, représente la partie de l'enthalpie totale susceptible d'être convertie en travail utile. Le reste de l'énergie est dissipé sous forme de chaleur, selon le terme  $T\Delta_r S$ .

$$\Delta_r G = \Delta_r H - T\Delta_r S \quad (III-28)$$

Sous une forme différentielle, (III-28), prend la forme :

$$dG = Vdp - SdT \quad (III-29)$$

L'équation de Faraday établit une relation entre l'enthalpie libre standard de réaction  $\Delta rG^0$  et la tension réversible  $E^0$  d'une pile à combustible à l'équilibre, c'est-à-dire en l'absence de débit de courant. Cette tension, également appelée tension à vide, est définie dans les conditions standard, notamment à une pression de 1 bar.

$$E^0 = \frac{-\Delta rG^0}{nF} \quad (III-30)$$

Où  $n$  désigne le nombre d'électrons impliqués dans la réaction globale, et  $F$  la constante de Faraday  $F = 96500 \text{ C/mol}$ .

À une pression de 1 bar et une température de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , la variation standard d'enthalpie libre associée à la réaction globale  $\text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}_{(\text{liq})}$  est :  $\Delta rG^0 = 237,1 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ . La tension à vide standard obtenue à partir de l'équation (III-30), pour une pile à combustible hydrogène-oxygène, s'exprime alors par :

$$E^0 = -\frac{-237,1 \times 10^3}{2 \times 96500} = 1,229 \text{ V}$$

Indépendamment de l'état de l'eau (liquide ou vapeur), pour une pression de 1 bar et une température de  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\Delta rG^0 = -228,6 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$  et  $E^0 = 1,185 \text{ V}$ .

### III.3.1.3 Influence de la température

À partir de l'équation (III-29) on peut exprimer l'entropie à pression constante sous la forme :

$$S = \left( \frac{-\partial G}{\partial T} \right)_P$$

D'après l'équation de Faraday (III-30), et sachant que, selon les observations expérimentales, la tension à vide dépend uniquement de la température [13,20] on peut alors écrire :

$$\left( -\frac{\partial \Delta rG}{\partial T} \right)_P = nF \frac{dE}{dT} \quad \text{soit} \quad \frac{\Delta rS}{nF} = \frac{dE}{dT} \quad (III-31)$$

Lors de son fonctionnement, une pile à combustible libère de la chaleur vers le milieu ambiant, ce qui se traduit thermodynamiquement par un terme  $T\Delta S < 0$ . En conséquence, le potentiel réversible de la pile diminue avec l'augmentation de la température

( $dE/dT < 0$ ). Toutefois, cette observation s'applique uniquement à un système idéal et réversible. Dans une pile réelle, le potentiel est également affecté par des irréversibilités, dont certaines peuvent être atténuées par une élévation de température. C'est le cas des irréversibilités causées par l'énergie d'activation nécessaire aux réactions.

### III.3.1.4 Influence de la pression

Soit la réaction électrochimique suivante :



Où  $A$  et  $B$  sont les réactifs,  $C$  et  $D$  les produits,  $v_a$ ,  $v_b$ ,  $v_c$  et  $v_d$  les coefficients stœchiométriques.

L'équation de Nernst s'écrit :

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \left( \frac{(\alpha_C)^{v_c} (\alpha_D)^{v_d}}{(\alpha_A)^{v_a} (\alpha_B)^{v_b}} \right) \quad (III-33)$$

Tel que  $\alpha$  représente l'activité des différents composants.

Pour les gaz, l'activité est égale à la pression partielle  $p$ . En appliquant la relation (III-33) à la réaction globale  $H_2 + 1/2 O_2 \rightarrow 2H_2O_{(liq)}$  on obtient :

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \left[ \frac{\alpha_{H_2O}}{\alpha_{H_2} \times (\alpha_{O_2})^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (III-34)$$

Sachant que l'activité de l'eau liquide est  $\alpha_{H_2O} = 1$  :

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \left[ \frac{1}{p_{H_2} \times (p_{O_2})^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (III-35)$$

On peut ainsi observer que la tension délivrée par la pile à combustible augmente avec la pression partielle des gaz réactifs. Toutefois, cette augmentation suit une loi logarithmique, ce qui implique que le gain de tension reste limité. Par ailleurs, il convient de tenir compte de l'énergie nécessaire à la compression des gaz. À titre d'exemple, pour des pressions d'hydrogène et d'oxygène variant de 1 à 30 bar à une température de 25 °C, le gain en tension obtenu n'est que de 0,065 V.

### III.3.2 Potentiel de polarisation

Les potentiels de polarisation d'une pile à combustible correspondent aux pertes de tension liées aux irréversibilités internes du système. La tension effective  $U$  d'une pile en fonctionnement s'obtient en soustrayant ces pertes à la tension réversible. Trois types principaux de polarisation peuvent être distingués :

- La polarisation d'activation  $E_{act}$ , liée à la cinétique des réactions électrochimiques à l'interface entre l'électrode et la membrane.
- La polarisation ohmique  $E_{ohm}$ , due aux résistances électriques internes de la pile (membrane, électrodes, contacts).
- La polarisation de concentration  $E_{conc}$ , causée par la variation des concentrations des réactifs à la surface des électrodes.

Le type de polarisation dominant dépend de la densité de courant débitée par la pile. Figure III.19 illustre l'évolution de la tension réelle  $U$  d'une PEMFC en fonction de cette densité. Ce type de représentation est communément

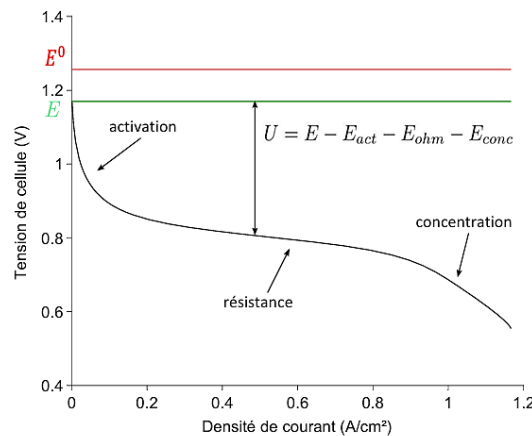


Figure III.19 : courbe de polarisation d'une cellule de PEMFC

#### III.3.2.1 Potentiel d'activation

Le rendement d'une pile à combustible dépend étroitement de la vitesse des réactions électrochimiques se produisant à l'anode et à la cathode. Cependant, la réduction de l'oxygène et l'oxydation de l'hydrogène sont naturellement lentes, ce qui nécessite une accélération de ces réactions afin d'optimiser les performances de la pile. À cet effet, la loi empirique d'Arrhenius (III-36), couramment utilisée en cinétique chimique, permet de modéliser l'évolution de la vitesse de réaction en fonction de la température et de l'énergie d'activation  $E_{act}$ .

$$k = A \exp\left(\frac{-E_{act}}{RT}\right) \quad (III-36)$$

Dans l'expression de la loi d'Arrhenius,  $k$  représente la constante de vitesse de réaction, et  $A$  une constante pré-exponentielle dépendant de la nature de la réaction. On en déduit qu'une élévation de la température favorise l'augmentation de la vitesse de réaction. Inversement, réduire l'énergie d'activation  $E_{act}$  nécessaire pour initier la réaction permet également d'augmenter  $k$ . C'est précisément le rôle du catalyseur : abaisser l'énergie d'activation tout en accélérant les réactions électrochimiques.

Dans les piles à combustible, et en particulier dans les PEMFC, le platine est le catalyseur le plus couramment utilisé, en raison de ses excellentes propriétés physico-chimiques : malléabilité, conductivité électrique, stabilité chimique. Il est généralement déposé sous forme de nanoparticules sur un support conducteur (tel que le carbone) afin de maximiser la surface d'échange. Ces particules forment des sites actifs où ont lieu les réactions électrochimiques, à l'interface catalyseur-carbone-électrolyte, connue sous le nom de zone de triple contact.

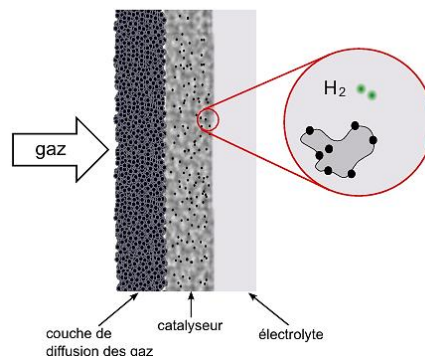


Figure III.20 : zone de triple contact

### III.3.2.1.1 Energie d'activation

L'énergie d'activation d'une réaction chimique peut être estimée à partir des enthalpies de liaison des molécules impliquées. Par exemple, dans le cas de la réaction entre l'hydrogène et l'oxygène, cette énergie correspond à la somme des énergies de dissociation d'une molécule de dihydrogène et d'une demi-molécule de dioxygène.



Soit une énergie d'activation de  $655 \text{ kJmol}^{-1}$ .

### III.3.2.1.2 Equation de Butler-Volmer

L'énergie d'activation consommée au niveau de l'anode et de la cathode entraîne une réduction du potentiel électrochimique de chaque électrode. Cette perte est appelée polarisation d'activation, notée  $E_{act}$ . Elle est directement liée à la densité de courant  $j$ , et peut être décrite par l'équation de Butler-Volmer, qui modélise la cinétique des réactions électrochimiques aux interfaces électrode-électrolyte.

$$j = j_0 \left[ \exp\left(\frac{\alpha n F}{RT} E_{act}\right) - \exp\left(-\frac{(1-\alpha)n F}{RT} E_{act}\right) \right] \quad (III-37)$$

Où  $n$  est le nombre d'électrons transférés,  $j_0$  la densité de courant d'échange et  $\alpha$  le coefficient de transfert de charges. La densité de courant d'échange est la mesure du taux de transfert de charges à l'équilibre. Plus il est élevé, plus la réaction est facile à initier.  $\alpha$  indique la répartition du potentiel d'activation entre l'anode et la cathode tel que  $\alpha_{anode} + \alpha_{cathode} = 1$ . Il donne la proportion du potentiel d'activation nécessaire pour l'énergie d'activation anodique qui correspond au sens direct de l'équation  $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O_{(liq)}$ . Cette proportion à la cathode est donc  $(1 - \alpha)$ .

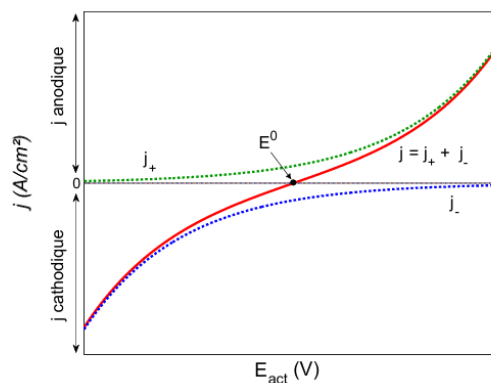


Figure III.21 : représentation de l'équation de Butler-Volmer

La densité de courant cathodique  $j_-$  correspond au transport des charges positives (ions) de la phase électrolytique vers la phase solide de l'électrode. À l'inverse, la densité de courant anodique  $j_+$  représente le mouvement des charges négatives de la solution vers l'électrode (voir la Figure III.21 : représentation de l'équation de Butler-Volmer1). La somme de ces deux densités de courant partiel constitue le courant total, mesurable à l'aide d'un ampèremètre connecté dans le circuit externe.

Lorsque la polarisation est suffisamment élevée, c'est-à-dire pour des valeurs de  $|E| \gg RT/F$  (en général supérieures à 50 ou 100 mV), le terme correspondant à la réaction

inverse devient négligeable. Dans ce cas, on utilise l'approximation de Tafel, forme simplifiée de l'équation de Butler-Volmer, pour modéliser le comportement électrochimique de l'électrode.

$$j = j_0 \exp\left(\frac{\alpha n F}{RT} E_{act}\right) \quad (III-38)$$

Soit :

$$E_{act} = -\frac{RT}{\alpha n F} \ln j_0 + \frac{RT}{\alpha n F} \ln j \quad (III-39)$$

que l'on peut écrire :

$$E_{act} = a + b \ln |j| \quad (III-40)$$

La représentation graphique de  $E_{act}$  en fonction de  $\ln |j|$  permet ensuite de déduire  $\alpha$  du coefficient directeur et  $j_0$  de l'intersection à l'origine.

Par convention, dans les réactions d'oxydoréduction, le courant anodique est considéré comme positif et le courant cathodique comme négatif. Dans le cas d'une pile à combustible, la réaction d'oxydation de l'hydrogène à l'anode est très rapide par rapport à la réduction de l'oxygène à la cathode. Par conséquent, la polarisation d'activation est principalement mesurée à la cathode.

Bien que l'équation (III-39) indique que la pente de la courbe de polarisation augmente avec la température, c'est en réalité sur la densité de courant d'échange  $j_0$  que l'effet de la température est le plus significatif. En effet, c'est cette grandeur qui contrôle essentiellement la cinétique de réaction, comme le montre la relation suivante :

$$j_0 = n F C_r f \exp\left(\frac{-\Delta r G}{RT}\right) \quad (III-41)$$

Où  $C_r$  est la concentration des réactifs et  $f$  le taux de décroissance que l'on peut considérer constant. Par conséquent, pour augmenter  $j_0$  et donc réduire  $E_{act}$ , il existe quatre modes d'action :

- Augmenter la concentration des réactifs

- Augmenter la température de réaction
- Diminuer l'énergie d'activation (catalyseur)
- Augmenter la surface active des électrodes

### III.3.2.2 Potentiel de résistance

Le potentiel ohmique  $E_{ohm}$  résulte de deux contributions principales : la résistance interne de la membrane électrolytique  $R_{memb}$ , et la résistance de contact  $R_{cont}$ , qui provient des interfaces entre les collecteurs de courant, les plaques bipolaires et les électrodes. Ainsi, la résistance totale de la cellule est égale à la somme de ces deux résistances.

$$R_{cell} = R_{memb} + R_{cont} \quad (III-42)$$

Le potentiel ohmique peut alors être déterminé à partir de la loi d'Ohm, en connaissant le courant  $i$  débité par la pile.

$$E_{ohm} = R_{cell}i \quad (III-43)$$

Pour les pile de type PEM, la résistivité de membrane  $R_{memb}$  ( $\Omega\text{cm}^2$ ) est généralement déterminée par la relation suivante :

$$R_{memb} = e_{memb} / \sigma_{memb} \quad (III-44)$$

Où  $e_{memb}$  est l'épaisseur de la membrane et  $\sigma_{memb}$  sa conductivité en  $(\Omega\text{cm})^{-1}$ .

### III.3.2.3 Potentiel de concentration

Comme nous l'avons vu à partir de l'équation de Nernst (III-34), le potentiel d'équilibre d'une pile peut être estimé en fonction de la pression partielle des gaz réactifs, c'est-à-dire de leur concentration. Ainsi, une diminution de la concentration des réactifs induit une baisse du potentiel électrochimique. Ce phénomène se manifeste notamment lorsque le débit des gaz devient insuffisant pour répondre à la demande, entraînant une chute rapide de la tension au-delà d'un courant limite  $i_L$ .

Lorsque ce seuil est franchi, la pile entre en régime de polarisation de concentration, où la tension chute brutalement. Pour modéliser ce comportement, Yerramalla et al [21], proposent une formulation empirique du potentiel de concentration, exprimée par la relation suivante.

$$E_{conc} = \alpha_{conc} \frac{RT}{nF} \ln\left(\frac{i_L}{i_L - i}\right) \quad (III-45)$$

Où  $\alpha_{conc}$  est un paramètre à identifier [13].

### III.3.3 Rendement d'une PEMFC

Le rendement énergétique d'une cellule, également appelé rendement potentiel, est directement lié à sa tension de fonctionnement. Il correspond au rapport entre l'énergie électrique réellement délivrée par la cellule et l'énergie totale mise en jeu, représentée par l'enthalpie de réaction. Dans les conditions standards, cette enthalpie est de 286 kJ/mol, ce qui équivaut à un potentiel thermoneutre de 1,48 V.

Le rendement énergétique peut être déterminé en divisant la tension de sortie de la cellule par ce potentiel thermoneutre (III-46). Ce rendement varie en fonction de la densité de courant : il atteint environ 65 % à courant nul et peut descendre jusqu'à 34 % lorsque la tension est limitée à 0,5 V.

$$\eta_{FC} = \frac{U}{U_{th}} \quad (III-46)$$

Où  $U$  tension de la cellule en (V) et  $U_{th}$  potentiel thermoneutre (1,48 V).

Le rendement énergétique d'une pile à combustible est fréquemment calculé en se basant sur l'enthalpie libre de la réaction de formation de l'eau, soit 241 kJ/mol, ce qui correspond à un potentiel d'équilibre de 1,23 V. On distingue ainsi deux types de rendements selon la base de référence utilisée : le rendement basé sur le pouvoir calorifique inférieur (PCI) de l'hydrogène, associé au potentiel d'équilibre, et celui basé sur le pouvoir calorifique supérieur (PCS), utilisé dans notre approche.

Ce rendement peut être amélioré par l'élévation de la température de fonctionnement des cellules et par l'augmentation des pressions partielles en hydrogène et en oxygène [22, 23].

Le rendement faradique, ou rendement de courant  $\eta_F$ , tient compte des pertes dues à la diffusion d'une partie de l'hydrogène et de l'oxygène à travers la membrane, suivie de

leur recombinaison sans production d'énergie utile. Ce rendement est généralement très proche de 1.

Le rendement global de la pile à combustible, appelé rendement de puissance, s'obtient en multipliant le rendement faradique par le rendement énergétique. Ce rendement global est un indicateur essentiel du bon fonctionnement de la pile.

Plusieurs éléments techniques influencent directement ce rendement :

- Alimentation de la cathode : souvent en mode ouvert, à l'aide d'air, parfois enrichi en oxygène. Un ventilateur ou un compresseur fournit le débit nécessaire pour atteindre une stœchiométrie comprise entre 1,5 et 2. Le facteur stœchiométrique est défini comme le rapport entre le débit de gaz fourni et celui réellement consommé. Le gaz excédentaire est évacué, et une vanne déverseuse maintient la pression de fonctionnement.
- Alimentation de l'anode : peut fonctionner en mode ouvert, fermé ou avec recirculation de l'hydrogène non consommé. L'hydrogène, stocké sous pression, est détendu à la pression de fonctionnement puis humidifié. En mode ouvert, le facteur stœchiométrique est généralement de 1,5.
- Évacuation de l'eau produite : cruciale pour éviter les dysfonctionnements. Dans les piles alcalines, l'eau dilue l'électrolyte, réduisant sa conductivité. Dans les piles à membrane, l'eau peut obstruer les canaux de circulation des gaz. On utilise alors des séparateurs gaz/liquide pour les systèmes à membrane. En revanche, les piles alcalines nécessitent un système plus complexe (évaporateur, condenseur...).
- Circuit de refroidissement : permet de maintenir la température optimale de fonctionnement, souvent par l'intermédiaire d'une pompe.
- Circuit d'humidification : assure l'humidification des gaz réactifs et de la membrane, via une pompe et un système de chauffage.
- Contrôle de la tension des cellules : un indicateur important permettant de détecter d'éventuels dommages au niveau de la membrane.
- Contrôle des grandeurs physiques : telles que la température, la pression, etc.

Ainsi, le rendement global d'un système à pile à combustible doit être évalué en tenant compte non seulement des rendements intrinsèques de la pile, mais aussi de la

consommation énergétique de l'ensemble des auxiliaires associés, comme illustré par l'équation.

$$\eta_{global} = \frac{P_{FC} - P_{CI}}{P_{GAZ}} \quad (III-47)$$

Avec :

- $\eta_{global}$  : rendement global ou rendement de puissance de la pile (%)
- $P_{FC}$  : puissance délivrée par la pile à combustible (W)
- $P_{CI}$  : puissance consommée par le périphérique (W)
- $P_{GAZ}$  : puissance consommée sous forme de gaz (W) [22].

### III.4 Stratégie de gestion de l'énergie

La gestion de l'énergie dans ce système hybride repose sur une boucle de commande ouverte conçue pour assurer un équilibre dynamique entre la puissance disponible et la puissance demandée par la charge. Cette approche vise à ce que la pile à combustible n'intervienne que pour compenser précisément le déficit énergétique non couvert par la source photovoltaïque.

Dans cette architecture, le générateur photovoltaïque et la pile à combustible sont connectés en parallèle sur le même bus DC. Cette configuration implique une interaction directe entre les deux sources : toute variation de puissance délivrée par le PV entraîne une variation de la tension du bus DC, qui influe automatiquement sur le point de fonctionnement de la PAC, notamment sa tension, et donc sa puissance de sortie.

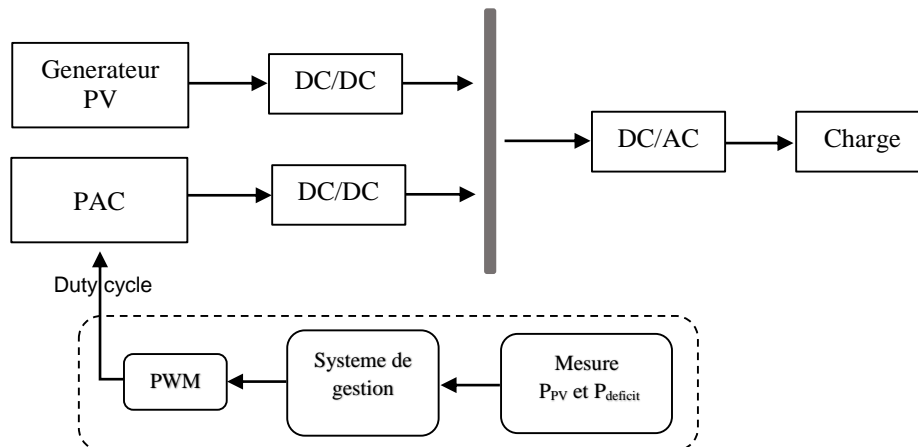


Figure III.22 : Synoptique du système hybride

Le fonctionnement repose sur les étapes suivantes :

La puissance délivrée par la source photovoltaïque  $P_{PV}$  et la puissance exigée par la charge  $P_{charge}$  sont mesurées instantanément.

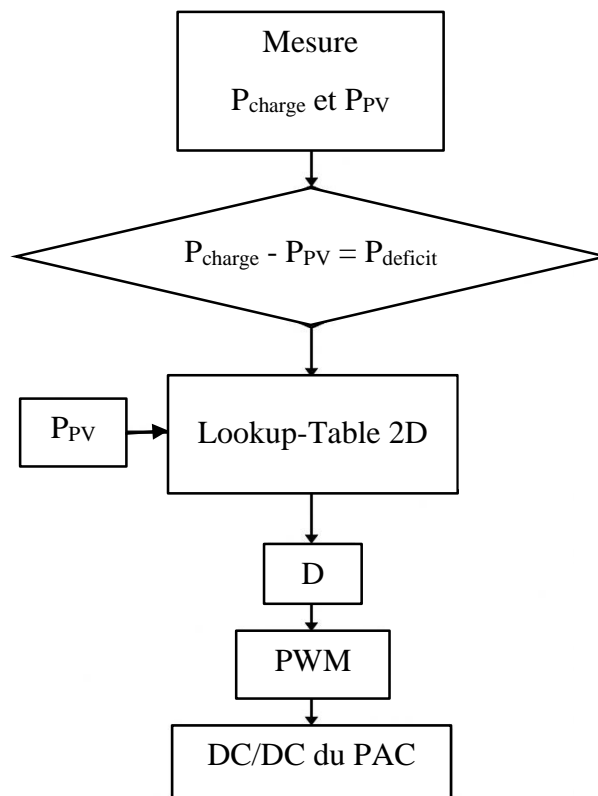
On calcule alors le déficit de puissance selon la relation :

$$P_{déficit} = P_{charge} - P_{PV}$$

En suite ce déficit, accompagné de la puissance photovoltaïque instantanée, est utilisé comme double entrée d'une table de correspondance, qui génère en sortie un rapport cyclique (duty cycle) adapté à la situation.

Le rapport cyclique obtenu permet de piloter le convertisseur DC/DC de la pile à combustible, de manière à adapter précisément sa puissance injectée au déficit constaté.

Le fonctionnement global de cette stratégie de gestion énergétique peut être synthétisé à travers l'organigramme suivant, qui illustre les étapes clés du processus de calcul et de régulation du déficit de puissance.



**Figure III.23** : logigramme fonctionnel du système de gestion

Ce mécanisme de commande assure une réponse rapide et ajustée de la pile, sans surdimensionnement, en tenant compte des interactions naturelles imposées par la connexion parallèle sur le bus DC. Ainsi, la régulation permet de maintenir une alimentation stable et continue de la charge, même face aux variations de l'irradiation solaire ou des conditions ambiantes.

### **III.5 Conclusion**

La modélisation du système hybride photovoltaïque–pile à combustible constitue une étape déterminante pour l’optimisation de sa performance et son intégration dans des contextes énergétiques réels. Ce chapitre a permis de traduire les comportements physiques des principaux sous-systèmes : générateur photovoltaïque, pile à combustible de type PEMFC, convertisseur DC/DC et stratégie de gestion énergétique en modèles mathématiques représentatifs.

Grâce à cette approche, il a été possible d’évaluer l’influence des paramètres environnementaux tels que l’irradiation et la température sur le rendement du système, tout en mettant en lumière les pertes internes (polarisation, résistance, concentration) inhérentes au fonctionnement des piles à combustible. L’intégration d’une boucle de régulation ouverte assurant un équilibre dynamique de la puissance entre les sources permet d’envisager un système autonome et robuste.

Les modèles développés ici constituent la base de simulation dynamique présentée dans le chapitre suivant, et ouvrent la voie à une analyse approfondie du comportement global du système dans différentes conditions de fonctionnement.

## Chapitre IV

## Simulation et Analyse des résultats

## IV.1 Introduction

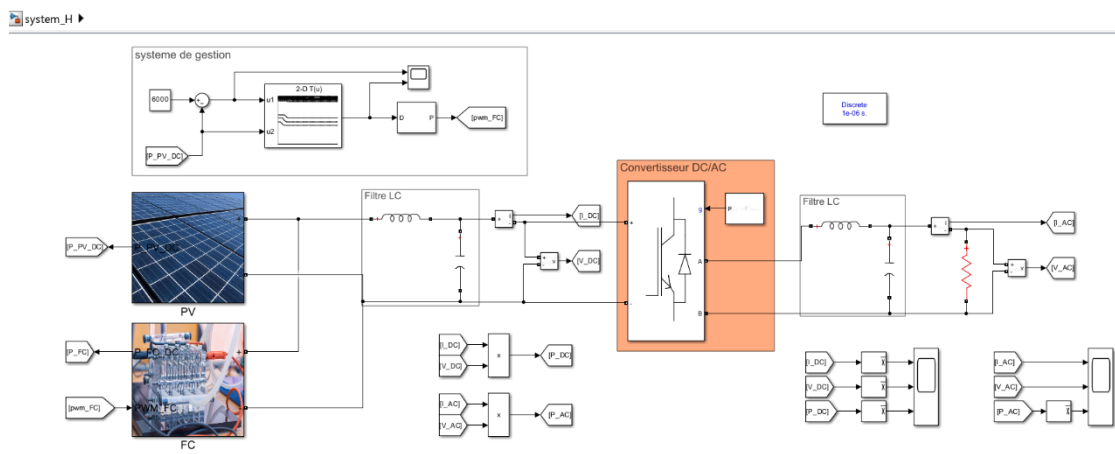
Après avoir établi une modélisation détaillée des principaux composants du système hybride photovoltaïque–pile à combustible, cette partie se consacre à la simulation et à l’analyse des performances en régime permanent. L’objectif principal est de vérifier la capacité du système à fournir de manière continue et stable une puissance de 6000 W destinée à alimenter une charge monophasée fixe.

La simulation est réalisée sous l’environnement MATLAB/Simulink en intégrant les modèles précédemment développés : générateur photovoltaïque avec MPPT, pile à combustible de type PEMFC, convertisseurs DC/DC et DC/AC, ainsi que la stratégie de gestion énergétique basée sur la compensation dynamique du déficit de puissance.

Les résultats présentés permettront d’évaluer le comportement des différentes sources d’énergie, la stabilité du bus DC, ainsi que la qualité de la tension et du courant en sortie AC. Cette simulation vise à valider le dimensionnement et l’efficacité de la stratégie de pilotage dans des conditions réalistes d’ensoleillement et de température.

## IV.2 Description du schéma global de simulation

Le schéma global du système hybride simulé sous MATLAB/Simulink regroupe l’ensemble des composants nécessaires à l’alimentation stable de la charge. Il repose sur une architecture en parallèle entre la source photovoltaïque et la pile à combustible, connectées à un bus DC commun, suivi d’un convertisseur DC/AC (voir la Figure IV.1).



**Figure IV.1 :** Architecture du système PV–FC sous Simulink

Le pilotage de l’ensemble repose sur un système de gestion énergétique situé en amont de la pile, qui compare en temps réel la puissance disponible en sortie du champ

photovoltaïque à la puissance cible de 6000 W. Le déficit de puissance détecté est ensuite injecté dans une table de correspondance (2D Lookup Table), qui génère un rapport cyclique (duty cycle) de commande PWM permettant de réguler dynamiquement la puissance fournie par la pile à combustible. Ce système assure ainsi une adaptation automatique et continue de la contribution de la PAC, garantissant la stabilité du bus DC et l'alimentation fiable de la charge.

Chaque sous-système est brièvement présenté ci-dessous.

### IV.2.1 Bloc PV

La Figure IV.2 illustre le bloc du générateur photovoltaïque. Il regroupe les éléments nécessaires à la production, au suivi et à la conversion de l'énergie solaire.

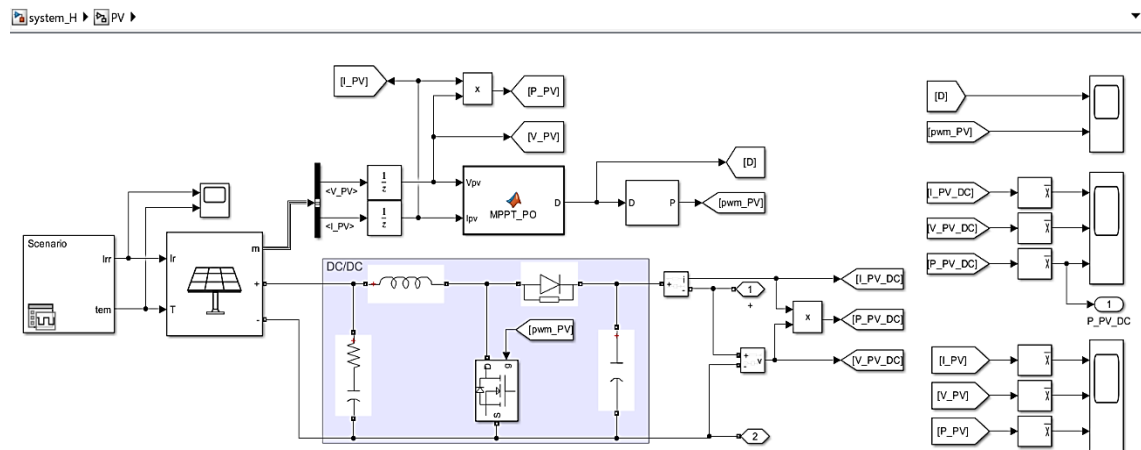
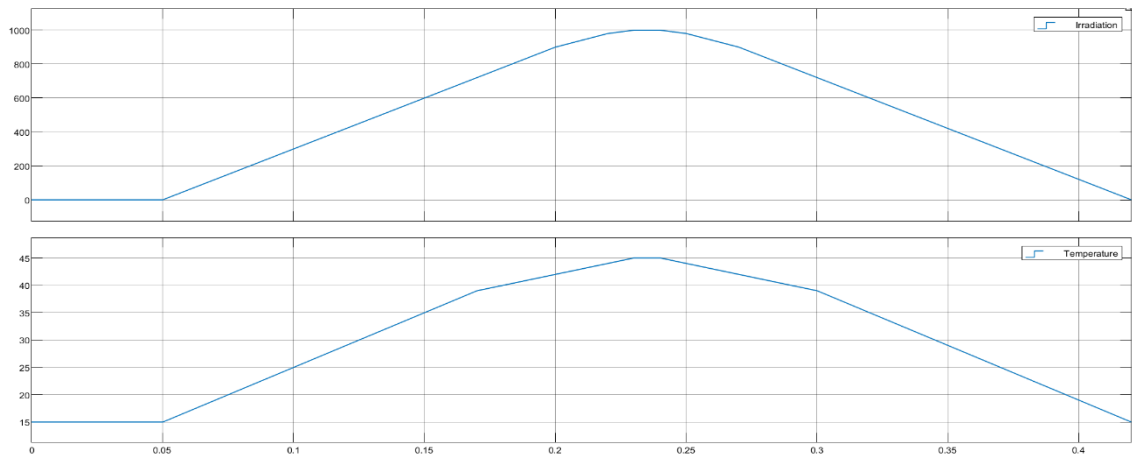


Figure IV.2 : Modèle Simulink du système PV

Ce bloc comprend l'injection des conditions climatiques, le modèle du panneau solaire, l'algorithme MPPT, et le convertisseur DC/DC. Chacun de ces sous-blocs sera détaillé individuellement dans les sections suivantes.

#### IV.2.1.1 Profile d'irradiation et de température

Le bloc Scenario simule les variations journalières de l'irradiation solaire (en  $W/m^2$ ) et de la température ambiante (en  $^{\circ}C$ ). Comme l'illustre la figure, l'irradiation augmente progressivement jusqu'à un pic de  $1000 W/m^2$  puis redescend, tandis que la température suit une pente ascendante jusqu'à  $45^{\circ}C$  avant de décroître (voir la Figure IV.3).



**Figure IV.3 :** Profils d'irradiation et de température

Ces deux grandeurs influencent directement le rendement du champ photovoltaïque. Leur intégration dynamique permet d'observer la réponse réelle du système PV face aux conditions climatiques changeantes.

#### IV.2.1.2 Caractéristiques du champ photovoltaïque

Le générateur est constitué de 6 modules en série et 3 chaînes en parallèle, avec des panneaux *Amerisolar AS-6M-350W*. Chaque module dispose d'une puissance nominale de 350 W, pour une puissance totale crête de 6300 W (voir la Figure IV.4).

The screenshot shows the 'Block Parameters: PV Array' dialog box. It includes a description of the block, input definitions, and several parameter sections:

- Array data:** Parallel strings: 3; Series-connected modules per string: 6.
- Module data:** Module: Amerisolar-Worldwide Energy and Manufacturing USA Co., Ltd AS-6V; Maximum Power (W): 350.0559; Cells per module (Ncell): 72; Open circuit voltage Voc (V): 47.64; Short-circuit current Isc (A): 9.59; Voltage at maximum power point Vmp (V): 38.51; Current at maximum power point Imp (A): 9.09; Temperature coefficient of Voc (%/deg.C): -0.297; Temperature coefficient of Isc (%/deg.C): 0.049103.
- Model parameters:** Light-generated current IL (A): 9.6509; Diode saturation current I0 (A): 2.8976e-11; Diode ideality factor: 0.97117; Shunt resistance Rsh (ohms): 367.1023; Series resistance Rs (ohms): 0.40738.
- Advanced options:** Display I-V and P-V characteristics of ...: array @ 1000 W/m2 & specified temperatures; T\_cell (deg. C): [ 15 25 35 45 ].

**Figure IV.4 :** Paramètres du GPV sous Simulink

Le bloc PV Array montre :

**Tableau IV-1** : Spécifications électriques du module PV

| Grandeurs   | Valeurs |
|---|---------|
| Tension à vide $V_{oc}$ (V)                         | 47.64   |
| Courant de court-circuit $I_{sc}$ (A)               | 9.59    |
| Tension au point de puissance maximale $V_{mp}$ (V) | 38.51   |
| Courant au MPP $I_{mp}$ (A)                         | 9.09    |

### IV.2.1.3 Algorithme MPPT (P&O)

Dans cette simulation, l'algorithme P&O est implémenté sous forme de code MATLAB, comme illustré dans la Figure IV.5. Il permet de générer un signal de commande PWM destiné au convertisseur DC/DC. L'objectif est d'assurer un fonctionnement du générateur photovoltaïque autour du point de puissance maximale, quelles que soient les variations d'irradiation ou de température.

```
function D = MPPT_PO(Vpv, Ipv)
persistent V_prev P_prev D_prev
if isempty(V_prev)
    V_prev = 0;
    P_prev = 0;
    D_prev = 0.5; % duty cycle initial (50%)
end

% Calcul puissance actuelle
P = Vpv * Ipv;

% Perturb & Observe
deltaV = Vpv - V_prev;
deltaP = P - P_prev;

if deltaP > 0
    if deltaV > 0
        D = D_prev - 0.01;
    else
        D = D_prev + 0.01;
    end
else
    if deltaV > 0
        D = D_prev + 0.01;
    else
        D = D_prev - 0.01;
    end
end

% Saturation (0 < D < 1)
D = max(0.05, min(0.95, D));

% Sauvegarde pour l'itération suivante
V_prev = Vpv;
P_prev = P;
D_prev = D;
```

**Figure IV.5** : Code MATLAB – MPPT (P&O)

L'évolution du rapport cyclique calculé en temps réel montre une bonne réactivité du système face aux changements d'ensoleillement, garantissant une extraction optimale de la puissance disponible.

#### IV.2.1.4 Les composants du convertisseur DC/DC

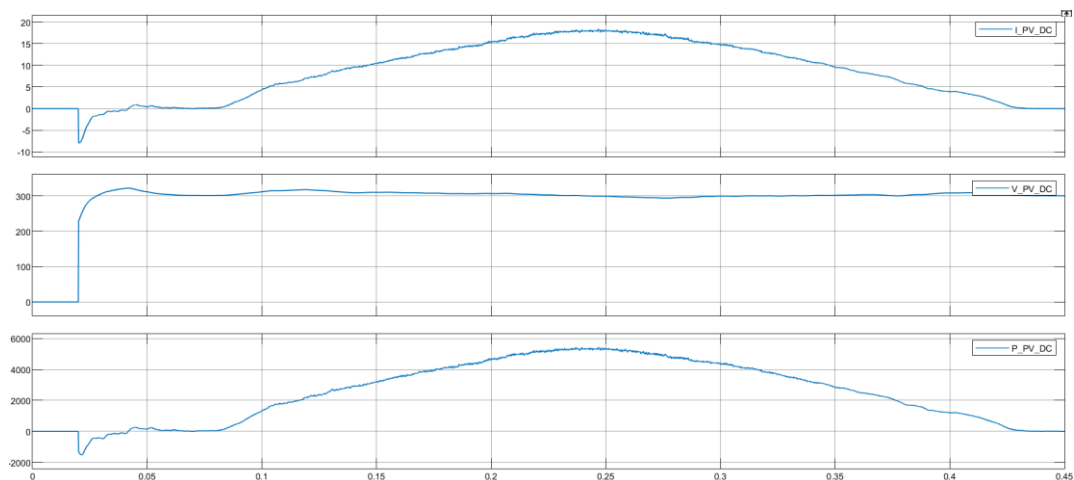
Dans le schéma du convertisseur Boost (voir la Figure IV.2), deux condensateurs sont utilisés, chacun remplissant une fonction spécifique. Le premier condensateur  $C_1$ , placé à l'entrée du convertisseur, en amont de l'inductance  $L$ , joue un rôle de filtrage de la tension PV afin d'améliorer la stabilité de la tension appliquée au convertisseur. Le deuxième condensateur  $C_2$ , situé à la sortie du convertisseur et connecté en parallèle au bus DC, permet de lisser la tension de sortie en réduisant l'ondulation provoquée par le fonctionnement en découpage.

**Tableau IV-2 :** Paramètres des composants du convertisseur

| composants                      | Valeurs             |
|---------------------------------|---------------------|
| premier condensateur $C_1$ (F)  | $330 \cdot 10^{-6}$ |
| Résistance $R$ ( $\Omega$ )     | $10^{-6}$           |
| Inductance $L$ (H)              | $0.1 \cdot 10^{-3}$ |
| deuxième condensateur $C_2$ (F) | $470 \cdot 10^{-6}$ |

#### IV.2.1.5 Les résultats de simulation du système PV

La Figure IV.6 présente les courbes de courant  $I_{PV\_DC}$ , tension  $V_{PV\_DC}$  et puissance  $P_{PV\_DC}$  en sortie du convertisseur DC/DC associé au générateur photovoltaïque.



**Figure IV.6 :** résultats de simulation du système PV

On observe que la tension  $V_{PV\_DC}$  atteint rapidement une valeur stabilisée autour de 320 V, ce qui confirme l'efficacité du convertisseur Boost et la pertinence du dimensionnement des composants passifs. La tension reste globalement constante malgré les variations d'ensoleillement, assurant ainsi une alimentation fiable du bus DC.

Le courant  $I_{PV\_DC}$  suit fidèlement l'évolution de l'irradiation solaire, atteignant un maximum d'environ 18 A. Cette progression est également visible sur la puissance  $P_{PV\_DC}$ , qui monte progressivement jusqu'à un pic supérieur à 5500 W avant de redescendre. La courbe de puissance est fluide et sans oscillations instables, signe d'un bon fonctionnement de l'algorithme MPPT et d'une conversion efficace de l'énergie solaire.

Dans l'ensemble, ces résultats démontrent la stabilité du système PV et sa capacité à répondre dynamiquement aux conditions climatiques variables tout en assurant une tension constante et une puissance maximisée vers la charge.

#### IV.2.1.6 Bloc PAC

La Figure IV.7 représente le bloc de la pile à combustible de type PEMFC intégré au système hybride.

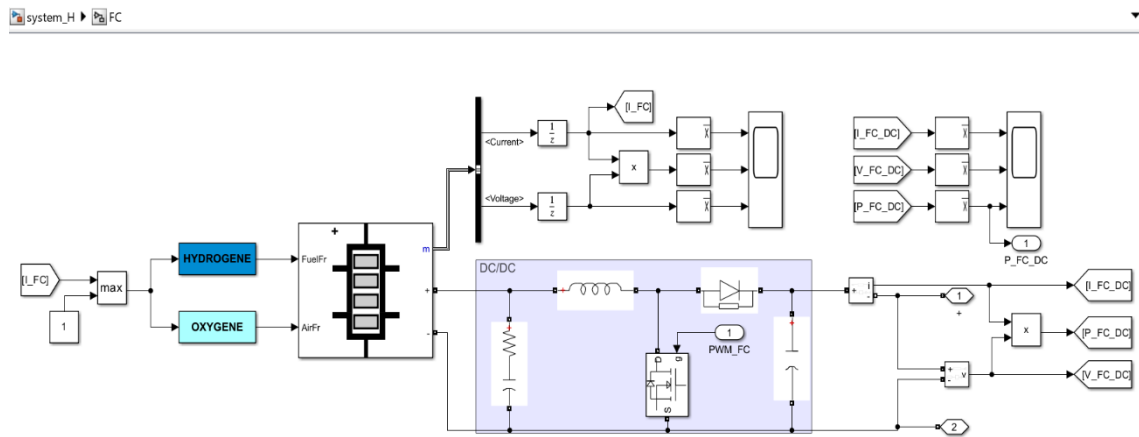


Figure IV.7 : Modèle Simulink du système PAC

Ce sous-système modélise le comportement électrochimique de la pile en fonction des débits d'hydrogène et d'oxygène, ainsi que des phénomènes internes tels que les pertes ohmiques et la polarisation.

### IV.2.1.7 Le débit d'hydrogène et d'oxygène

Le calcul des débits massiques de l'hydrogène et de l'oxygène alimentant la pile à combustible repose sur l'application des lois des gaz parfaits et des principes électrochimiques de la réaction redox. L'équation utilisée dans le modèle est la suivante

$$\dot{n} = \frac{60000 \times n \times R \times T \times I}{2 \times F \times P \times \eta_{util} \times \eta_{pur}} \quad (IV-1)$$

Avec :

- $R = 8,3145 \text{ J/mol.K}$  est la constante des gaz parfaits
- $T = 273+95$  est la température en K
- $I = 96485 \text{ C/mol}$  est la constante de Faraday
- $F = 96485 \text{ C/mol}$  est la constante de Faraday
- $P = 3 \times 101325$  est la pression (trois fois la pression atmosphérique)
- $\eta_{util} = 0,919$  est le taux d'utilisation de l'hydrogène
- $\eta_{pur} = 0,995$  représente le facteur de pureté du gaz
- $I = u(1)$  est le courant électrique délivré par la pile

60000 permet de convertir l'unité du débit molaire obtenu (en mol/s) vers litres par minute (L/min).

### IV.2.1.8 Caractéristiques de la PAC sous Simulink

Les deux courbes dans la Figure IV.8 représentent les caractéristiques électriques de la pile à combustible : la tension en fonction du courant (Stack voltage vs current) et la puissance en fonction du courant (Stack power vs current).

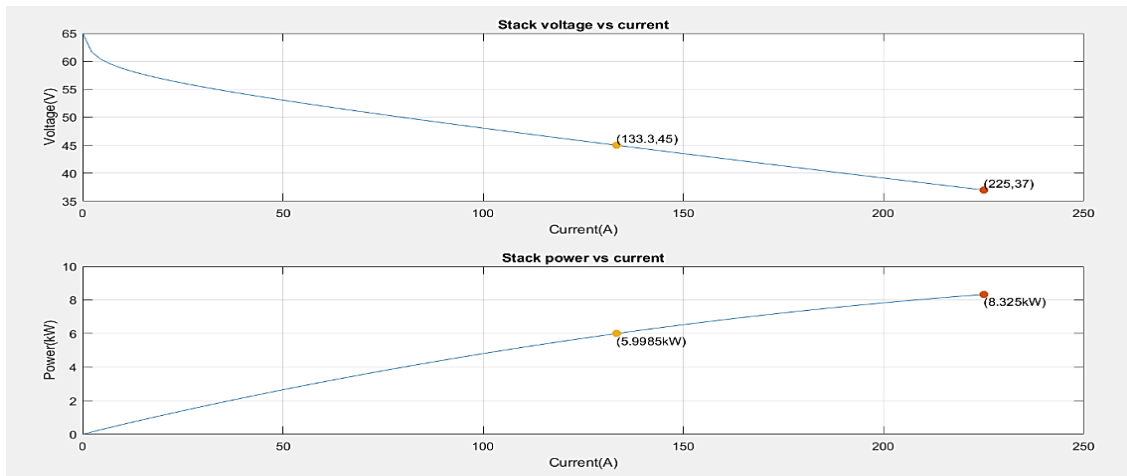


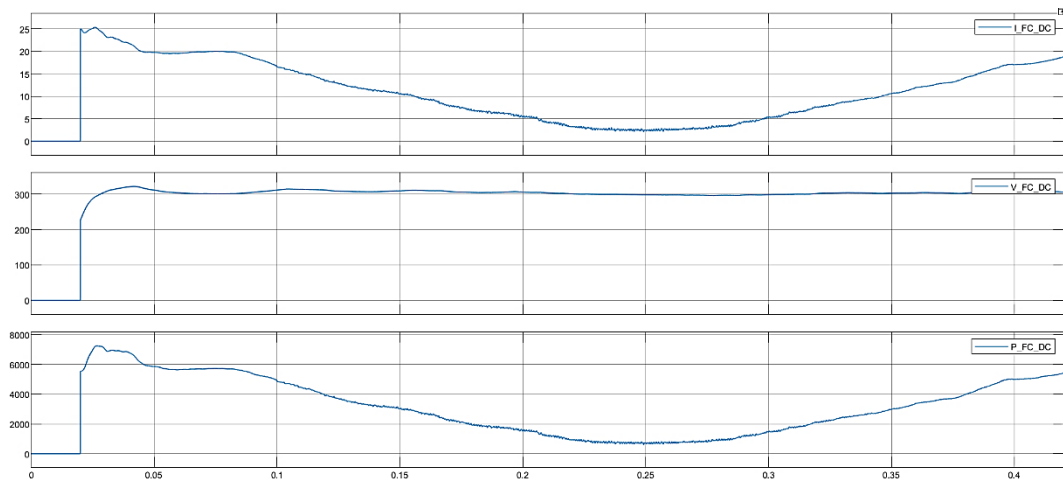
Figure IV.8 : Courbes V-I et P-I de la pile à combustible

La première courbe montre une diminution progressive de la tension avec l'augmentation du courant. Ce comportement est typique d'une pile à combustible, en raison des différentes pertes internes (pertes d'activation, ohmiques et de concentration). À titre d'exemple, la tension chute de  $\sim 63$  V à vide à environ 37 V lorsque le courant atteint 225 A.

La deuxième courbe illustre la puissance électrique délivrée par la pile en fonction du courant. On remarque que la puissance augmente avec le courant, jusqu'à atteindre un maximum de 8,325 kW pour 225 A. Le point optimal de fonctionnement est observé autour de 133 A, où la pile délivre environ 6 kW, ce qui correspond au régime de fonctionnement nominal adopté dans la simulation.

#### IV.2.1.9 Les résultats de simulation du système PAC

La Figure IV.9 illustre le comportement dynamique de la pile à combustible à travers les courbes de courant  $I_{FC\_DC}$ , tension  $V_{FC\_DC}$  et puissance  $P_{FC\_DC}$  délivrés en sortie du convertisseur DC/DC.



**Figure IV.9 :** résultats de simulation du système PAC

On observe que la tension reste stable autour de 320 V, confirmant le bon fonctionnement du convertisseur et son intégration correcte avec le bus DC. Ce maintien de la tension est crucial pour assurer la continuité de l'alimentation en cas de compensation de déficit énergétique.

Le courant de la PAC varie en fonction de la demande de puissance non couverte par le générateur photovoltaïque. Il suit une courbe en forme de «  $P_{PV\_DC}$  » inversé, débutant à environ 25 A, décroissant vers un minimum en milieu de simulation, puis remontant à

la fin. Ce profil témoigne d'une régulation efficace, la PAC intervenant en complément dynamique selon les fluctuations de l'énergie solaire.

#### **IV.2.1.10 Convertisseur DC/AC**

Le bloc DC/AC assure la conversion de la tension continue issue du bus DC en une tension alternative monophasée adaptée à la charge. Il est réalisé à l'aide d'un pont universel (Universal Bridge) commandé par un générateur PWM (2-Level).

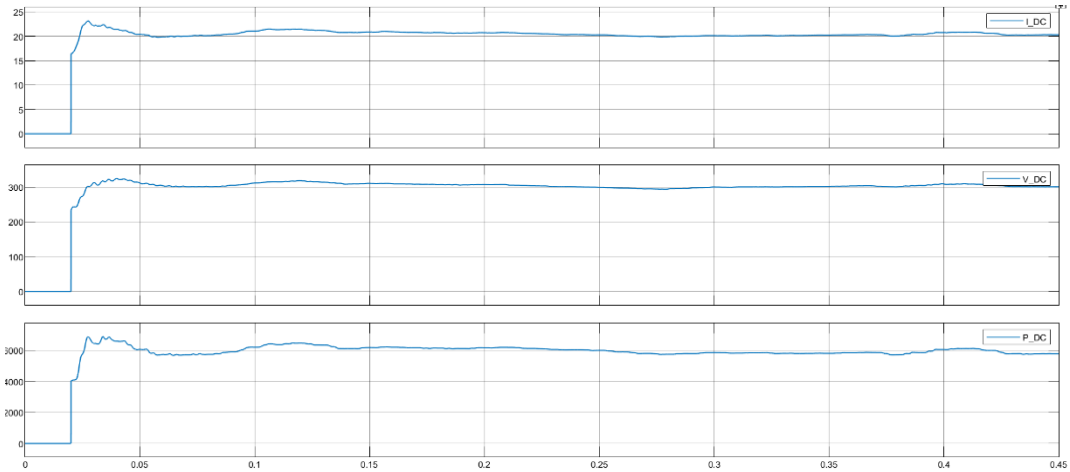
Le pont de conversion est constitué de 2 bras de pont utilisant des IGBT avec diodes de récupération. Les paramètres de snubber sont définis par une résistance  $R_s = 10^5 \Omega$  et une capacité  $C_s = \infty$ , ce qui correspond à une configuration sans snubber actif (valeurs très élevées pour éviter les effets pendant la discrétisation). La résistance à l'état passant est très faible  $R_{on} = 1m\Omega$ , et aucune chute de tension directe n'a été imposée ( $V_f = 0$ ).

Le générateur PWM utilisé est de type single-phase full-bridge (4 pulses), avec une fréquence de découpage de 10 kHz et une fréquence de modulation de 50 Hz, correspondant à une tension sinusoïdale de sortie. Le modulation index est fixé à 0,8, ce qui permet de contrôler l'amplitude de la tension AC générée. Le mode de fonctionnement est non synchronisé (unsynchronized) avec un échantillonnage naturel de la porteuse.

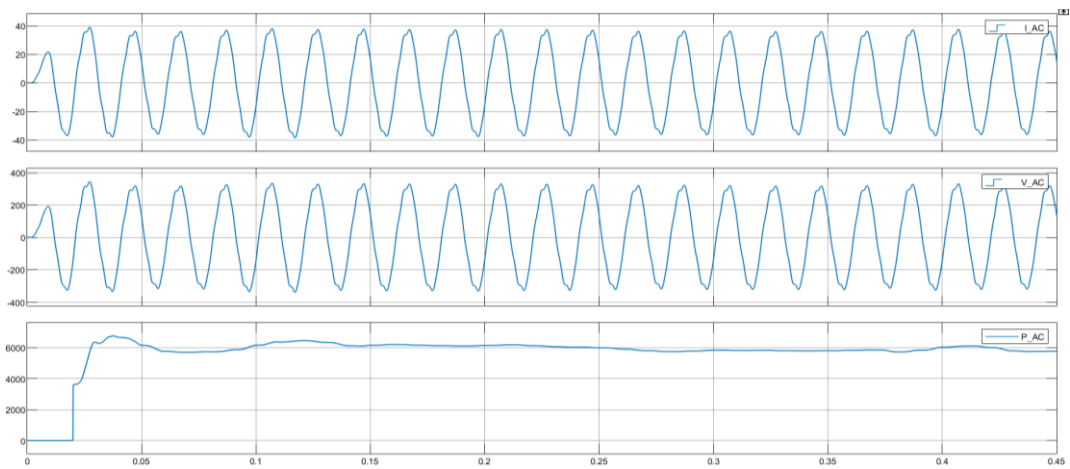
Cette configuration permet de générer une tension alternative propre et stable à partir de la tension DC du bus, avec une fréquence et une forme adaptées à la charge.

### IV.2.1.11 Analyse des résultats de simulation du système

Les figures ci-dessous présentent les principales grandeurs électriques simulées en régime permanent dans le système hybride PV-PAC, à savoir les tensions, courants et puissances au cotée DC et en sortie AC du convertisseur.



**Figure IV.10 :** Résultats de simulation au bus DC



**Figure IV.11 :** Résultats de simulation en sortie AC

Les courbes de  $I_{DC}$ ,  $V_{DC}$  et  $P_{DC}$  (Figure IV.10) montrent une stabilisation rapide dès 0,05 s, traduisant l'entrée en régime permanent.

- La tension  $V_{DC}$  se maintient autour de 320 V, ce qui est cohérent avec la tension requise pour alimenter le convertisseur DC/AC.
- Le courant  $I_{DC}$  reste globalement stable, ce qui confirme un transfert régulier d'énergie entre les sources (PV et PAC) et la charge.

- La puissance  $P_{DC}$  se stabilise autour de 6000 W, correspondant à la puissance demandée par la charge monophasée.

Ce comportement valide l'efficacité de la stratégie de gestion énergétique, ainsi que le dimensionnement des composants du convertisseur Boost et du filtre DC.

Les courbes de  $I_{AC}$ ,  $V_{AC}$  et PAC (Figure IV.11) montrent une forme sinusoïdale propre, bien régulée :

- La tension  $V_{AC}$  oscille symétriquement autour de zéro avec une amplitude crête d'environ 325 V, ce qui correspond à une tension efficace de 230 V RMS, conforme aux standards résidentiels.
- Le courant alternatif présente une forme sinusoïdale stable, indiquant une bonne qualité de conversion et une alimentation correcte de la charge.
- La puissance en sortie AC est constante et avoisine 6000 W, ce qui correspond à la puissance en sortie DC. Cela confirme un transfert efficace et sans pertes significatives entre le bus continu et la charge alternative.

Cela montre que le convertisseur DC/AC est bien commandé, que la fréquence de modulation est adaptée, et que le filtrage LC en sortie assure une qualité de tension satisfaisante.

### **IV.3 Conclusion**

La simulation du système hybride photovoltaïque–pile à combustible a permis de valider la faisabilité et la stabilité de l'alimentation d'une charge monophasée fixe de 6000 W. Les résultats obtenus mettent en évidence le bon fonctionnement de l'ensemble des blocs du système, notamment le suivi MPPT du générateur PV, la régulation dynamique de la pile à combustible via le système de gestion énergétique, la stabilité du bus DC et la qualité du signal AC en sortie. Le comportement du système en régime permanent montre une bonne coordination entre les sources, une réponse rapide face aux variations climatiques, et une conversion efficace jusqu'à la charge finale. Ces performances démontrent la pertinence de l'architecture adoptée et posent les bases pour des extensions futures intégrant des scénarios plus complexes.

# Conclusion générale

## Conclusion générale

Ce mémoire a porté sur la conception, la modélisation et la simulation d'un système hybride combinant une source photovoltaïque et une pile à combustible de type PEMFC, destiné à l'alimentation d'une charge monophasée autonome de 6000 W. Dans un contexte énergétique marqué par la nécessité de transition vers des solutions durables, ce type de système représente une alternative crédible et prometteuse pour répondre aux besoins énergétiques hors réseau tout en exploitant des ressources propres et renouvelables.

La première phase de ce travail a consisté en une étude approfondie des technologies mises en œuvre. Le générateur photovoltaïque a été modélisé en tenant compte des variations d'irradiation et de température, avec l'intégration d'un algorithme MPPT de type Perturb and Observe permettant d'optimiser l'extraction d'énergie. La pile à combustible a été modélisée selon une approche électrochimique réaliste, intégrant les principales pertes (activation, ohmique et concentration) et la relation entre débit de gaz et courant fourni. L'ensemble des composants de conversion (convertisseurs DC/DC, DC/AC) a également été dimensionné en fonction des besoins de la charge et de la stabilité du système.

La seconde phase, axée sur la simulation, a permis de valider le fonctionnement du système en régime permanent. À travers une configuration sous MATLAB/Simulink, il a été possible de tester l'efficacité de la gestion énergétique, qui donne la priorité à la source solaire et fait intervenir la pile à combustible en cas de déficit. Les résultats obtenus ont confirmé la capacité du système à maintenir une tension DC stable autour de 320 V, et à fournir une tension alternative sinusoïdale de 230 V RMS adaptée à une charge domestique.

D'un point de vue technique, le système a démontré une bonne coordination entre ses composants, une stabilité satisfaisante et une réponse efficace aux conditions variables d'ensoleillement. L'ensemble des résultats valide la faisabilité d'un système hybride PV–PAC bien dimensionné, capable d'assurer une alimentation continue, fiable et propre, dans le cadre d'une application autonome.

## Perspectives

Le système hybride développé dans ce travail constitue une base fonctionnelle robuste, mais il offre plusieurs axes d'amélioration intéressants pour des recherches futures, notamment dans le cadre d'un projet de doctorat. Une première perspective consiste à intégrer un électrolyseur PEM, permettant de valoriser les excédents d'énergie pour produire de l'hydrogène et ainsi boucler le système dans une logique d'autonomie énergétique. Par ailleurs, le système de gestion pourrait être renforcé par une boucle de régulation fermée plus avancée, intégrant des algorithmes prédictifs ou intelligents pour une meilleure stabilité face aux perturbations. Enfin, l'introduction d'une charge variable, représentant un profil de consommation réel (domestique ou industriel), permettrait de simuler des scénarios plus proches des conditions opérationnelles, tout en évaluant la réactivité et la flexibilité du système global.

## Bibliographie

- [1] A. Richel, L'hydrogène : comment une molécule découverte il y a plus de 5 siècles est devenue l'objet d'un emballage très récent de la recherche scientifique, Chem.4.us, 2023, pp. 16-18.
- [2] Académie des sciences, L'hydrogène aujourd'hui et demain, France, 2002.
- [3] A. Delpy, T. Vauchy, E. Barbier, C. Bernadot, P. Lacourte, C. Courgneau, C. Chamfort, I. Lambert, Y. Abraham, V. Celarier, E. Chomard, Q. Ropers, L. Gentil, A. Li, «Transport de l'Hydrogène», Mines ParisTech, Centre des Matériaux P.M. Fourt, 2021, pp. 6-7.
- [4] Comité de prospective en énergie de l'Académie des sciences, «Quelles perspectives énergétiques pour la biomasse ?», Académie des sciences, 2024.
- [5] P. Hollmuller, B. Lachal, F. Romerio, W. Weber, J. Zraggen, L'hydrogene, future vecteur energetique ?, Geneve: Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie, pp. 27, 33-35.
- [6] T. Hottinen, Technical Review and Economic Aspects of Hydrogen Storage Technologies, Helsinki University of technology, 2001.
- [7] J. Labbé, L'hydrogene electrolytique comme moyen de stockage d'electricite pour systemes photovoltaïques isoles, École des Mines de Paris, 2006, pp. 55-56.
- [8] Le CEA et la DGEC, Plan de déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique, Ministre de la Transition Écologique et Solidaire, p. 19.
- [9] W. Ely, Etude et gestion d'un systeme hybride éolien- Photovoltaïque autonome, Université du Québec, 2023, pp. 11-15.
- [10] X. Jiang, Étude comparative de structures de convertisseurs pour les systèmes photovoltaïques connectés à un réseau électrique moyenne tension, Université du Québec, 2019.
- [11] B. L. Sofia, Cours Energie Solaire Photovoltaïque, Université A. MIRA de BEJAIA, 2014-2015.
- [12] M. Bressel, Modélisation graphique pour le pronostic robuste de pile à combustible à Membrane Echangeuse de Proton, Université Lille 1 , 2016, p. 9.
- [13] V. Reguillet, Caractérisation d'un système pile à combustible en vue de garantir son démarrage et fonctionnement à température ambiante négative, Université de Franche-Comté, 2015, p. 8.

- 
- [14] W. Hankache, Gestion optimisée de l'énergie électrique d'un groupe électrogène hybride à pile à combustible, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2008, pp. 18-19.
- [15] E. Ramadan, B. Amina, B. Madjid, Étude et simulation des composants de système hybride éolien-Photovoltaïque avec stockage (supercondensateur - batteries), Proceedings of Engineering and Technology – PET, 2016.
- [16] A.K. Traoré, Gestion d'un système autonome hybride photovoltaïque éolien pour applications agricoles, Université du Québec , 2016.
- [17] A. Dolara, R. Faranda, S. Leva, Energy comparison of seven MPPT techniques for systems, J.Electromagnetic Analysis&Application, 2009.
- [18] J.L. Santos, F. Antunes, A. Chehab and C. Cruz, A Maximum Power Point Tracker for PV Systems Using a High Performance Boost Converter, Solar Energy, 2006, pp. 772-778.
- [19] K. Merabet, Commande d'un onduleurs triphasés basée sur la dispersion de la tension Triphasée, Université du Québec, 2011.
- [20] J.L. Bretonnet, Thermodynamique générale et appliquée, Ellipses, 2008.
- [21] S. Yerramalla, A. Davari, A. Feliachi, and T. Biswas, Modelling and simulation of the dynamic behavior of a polymer electrolyte membrane fuel cell, Journal of Power Sources, 2003.
- [22] I. Elferjani, De la réactivité des plaques bipolaires métalliques à la dégradation de la membrane : Modélisation couplée du vieillissement des piles à combustible, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2021.
- [23] J.C. Marcel, S. Busquet, R. Metkemeijer, D. Mayer, Photovoltaic fuel cell hybrid system for electricity and heat generation for remote sites, Germany, 2001.

## Résumé :

Ce mémoire présente la modélisation et la simulation d'un système hybride combinant une source photovoltaïque (GPV) et une pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC). L'objectif est d'assurer une alimentation électrique stable et optimisée pour une charge fixe, prioritairement alimentée par la source photovoltaïque, avec l'appui de la pile à combustible en cas de besoin. Le système est simulé sous MATLAB/Simulink, en intégrant les composants clés tels que les convertisseurs DC/DC, les modèles dynamiques et le contrôle par modulation PWM.

## Summary :

This thesis presents the modelling and simulation of a hybrid system combining a photovoltaic source (PV) and a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC). The objective is to ensure a stable and optimized power supply to a fixed load, primarily powered by the photovoltaic source, with the fuel cell providing support when necessary. The system is simulated using MATLAB/Simulink, integrating key components such as DC/DC converters, dynamic models, and PWM control.

## ملخص :

تعرض هذا المذكرة نمذجة ومحاكاة نظام هجين يجمع بين مصدر طاقة كهروضوئي (GPV) وخلية وقود ذات غشاء تبادل البروتونات (PEMFC). يهدف النظام إلى ضمان تغذية كهربائية مستقرة ومثلي لحمولة ثابتة، تتم تغذيتها بشكل أساسي من المصدر الكهروضوئي، مع دعم من خلية الوقود عند الحاجة. تم تنفيذ المحاكاة باستخدام برنامج MATLAB/Simulink، مع دمج المكونات الأساسية مثل محولات DC/DC، النماذج الديناميكية، والتحكم عن طريق تعديل عرض النبضة (PWM).