



وزارة البحث العلمي والتعليم العالي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم  
Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem  
كلية العلوم والتكنولوجيا  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie des Electrique



## MEMOIRE

Pour obtenir le diplôme de

### MASTER EN ELECROTECHNIQUE

Spécialité : Energies renouvelables

Présenté par

Benaicha Yamina

Nourine Elaid Lynda

Intitulé du sujet

**Etude et modélisation d'un système hybride  
autonome à base de PAC**

Soutenu le 30/06/2024 devant le jury composé de :

Président : Mr M.Bendaha

MAA

Université de Mostaganem

Examineur : Mme L.Ghomri

MCA

Université de Mostaganem

Encadrant : Mme H.Neddar

MCA

Université de Mostaganem

**Année Universitaire 2023/2024**

## *Remerciement*

*En premier lieu, nous remercions Dieu qui nous a procuré*

*.ce succès*

*C'est avec un grand plaisir que nous adressons nos sincères remerciements à notre professeur Madame " NEDDAR Houaria" pour ses conseils précieux et pour toutes les commodités et aisances qu'elle nous a apportés durant l'étude et la réalisation .de ce document*

*Nos remerciements les plus vifs s'adressent aux messieurs le président et les membres de jury d'avoir accepté*

*.d'examiner et d'évaluer notre travail*

*Sans omettre bien sûr de remercier profondément tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à réalisation du*

*.présent travail*

*Et enfin, que nos chers parents et familles, et bien avant tout, trouvent ici l'expression de nos remerciement les plus profonds en reconnaissance de leurs sacrifices, aides, soutien et encouragement afin de nous assurer cette*

*.formation dans les meilleures conditions*

# Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à*

*Mes très chères parents, pour leur sacrifices, et qui n'ont*

*Jamais cessé de m'encourager que Dieu me les garde.*

*Mes très chères sœurs*

*Mes très chers frères*

*Ma grand-mère qui Dieu le garde*

*Toute ma famille*

*Tous mes amis*

**Lynda**

# Dédicaces

*Mes très chères parents, pour leur sacrifices, et qui n'ont  
Jamais cessé de m'encourager que Dieu me les garde.*

*Mes très chères sœurs*

*Mes très chers frères*

*Toute ma famille*

*Tous mes amis*

**Yamina**

## **Le Résumé :**

Avec l'évolution rapide des nouvelles technologies et des installations sensibles nécessitant une alimentation électrique ininterrompue de haute qualité, les systèmes d'alimentation sans interruption connaissent une expansion significative. Ce phénomène est amplifié par la croissance dynamique des énergies renouvelables ces dernières années, en particulier avec l'émergence des systèmes hybrides.

C'est dans ce contexte que nous avons examiné un système d'alimentation sans interruption hybride, qui combine deux sources d'énergie : un générateur photovoltaïque et une pile à combustible.

**Mots clés :** Photovoltaïque ; Pile à combustible ; Electrolyseur ; Hydrogène ; Système Hybride.

## **الملخص:**

مع تقدم التكنولوجيا الحديثة بسرعة وتزايد الحاجة إلى توفير طاقة كهربائية مستمرة عالية الجودة للمرافق الحساسة، يشهد أنظمة التيار المتقطع تطوراً سريعاً. يتسارع هذا النمو بفعل زخم الطاقات المتجددة في السنوات الأخيرة، خاصة مع ظهور أنظمة الهجين.

وفي هذا السياق، قمنا بدراسة نظام تيار متقطع هجين، يجمع بين مصدري طاقة: مولد ضوئي وخلية وقود.

**الكلمات المفتاحية:** الكهروضوئي. خلية وقود. المحول الكهربائي. هيدروجين. نظام الهجين.

## **Abstract:**

With the rapid advancement of new technologies and the increasing demand for uninterrupted high-quality electrical power for sensitive installations, uninterruptible power supply systems are experiencing rapid development. This growth is particularly driven by the rising momentum of renewable energies in recent years, especially with the emergence of hybrid systems.

In this context, we have studied a hybrid uninterruptible power supply system composed of two energy sources: a photovoltaic generator and a fuel cell.

**Keywords:** Photovoltaic; Fuel cell; Electrolyze; Hydrogen; Hybrid system.

# Listes des figures

Figure I.1 : Schéma synoptique du système d'énergie hybride. ....	3
Figure I.2 : Classification des systèmes hybrides. ....	4
Figure I.3 : Cycle photovoltaïque. ....	5
Figure I.4 : Illustration d'une cellule photovoltaïque. ....	5
Figure I.5 : Cellules photovoltaïques monocristallines. ....	6
Figure I.6 : Cellules photovoltaïques poly-cristalline. ....	6
Figure I.7 : Cellules photovoltaïques amorphes. ....	6
Figure I.8 : Caractéristiques I(V) et P(V) d'une cellule photovoltaïque avec ( $E=1000W/m^2$ et $T=25^{\circ}C$ ). ....	8
Figure I.9 : Moyenne annuelle de l'énergie reçue en Algérie. ....	8
Figure I.10 : Schéma le principe de fonctionnement d'une batterie. ....	10
Figure I.11 : Schéma de principe de la batterie lithium-ion. ....	11
Figure I.12 : Liaisons hydrogène dans l'eau. ....	14
Figure I.13 : Cycle de l'hydrogène. ....	15
Figure I.14 : principe de l'électrolyseur. ....	17
Figure I.15 : principe schématique de l'électrolyse PEM. ....	18
Figure I.16 : Schéma de principe de l'électrolyse alcaline. ....	19
Figure I.17 : Schéma de principe de l'électrolyse à haute température. ....	20
Figure I.18 : Constitution général d'une pile à combustible. ....	22
Figure I.19 : Principe de fonctionnement de piles à combustible. ....	23
Figure II.1 : Le schéma global du système étudié.....	25

Figure II.2 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque. ....	26
Figure II .3. Modèle simplifié d'une cellule PV. ....	26
Figure II.4 : Caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ dans les conditions standards. ....	29
Figure II.5 : Caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ dans les conditions standards. ....	29
Figure II.6 : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ . ....	29
Figure II.7 : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ . ....	30
Figure II.8 : Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ . ....	30
Figure II.9 : Influence de la température sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ . ....	31
Figure II.10 : Courbe de polarisation de la pile à combustible .....	44
Figure II.11 : Circuit électrique équivalent d'une cellule en statique.....	51
Figure II.12 : Schéma électrique équivalent d'une cellule en dynamique.....	52
Figure II.13 : évolution du rendement du convertisseur DC-DC en fonction de sa puissance de sortie normalisée. ....	53
Figure II.14 : évolution du rendement de l'onduleur en fonction de sa puissance de sortie normalisée. ....	54
Figure III.1 : Schéma bloc de la générateur PV en MATLAB-SIMULINK. ....	54
Figure.III.2 : Connexion en série de 06 cellules. ....	55
Figure. III.3 : schéma bloc des cellules PV assemblées en série en MATLAB-Simulink.....	55
Figure. III. 4 : Caractéristique $P(V)$ d'une cellule ( $T=25^{\circ}C$ , $G=1000W/m^2$ ).....	56
Figure. III.5 : Caractéristique $I(V)$ d'une cellule ( $T=25^{\circ}C$ , $G=1000W/m^2$ ).....	56
Figure.III.6 : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque. ....	57
Figure.III.7 : Montre le système de point de puissance maximale (MPPT) pour un panneau photovoltaïque. ....	58

Figure III.8 : Modèle Simulink de pile à combustible PEM.....	59
Figure III.9 : schéma bloc 1 sélecteur de débit dans MATLAB SIMULINK.....	60
Figure III.10 : schéma bloc 2 régulateur de débit dans MATLAB SIMILUNK.....	60
Figure III.11 : schéma bloc 3 du cycle de service.....	60
Figure III.12 courbe de polarisation de la pile à combustible.....	61
Figure III.13 : tension et courant de pile à combustible.....	63
Figure III.14 Variation de tension et courant pour convertisseur élévateur DC/DC (Boost) en fonction de temps. ....	63
Figure III.15 : Utilisation de l'hydrogène et de l'oxygène.....	64
Figure III.16 : consommation de la pile de combustible pour l'air et le combustible.....	64
Figure III.17 : rendement de pile à combustible.....	65

#### **Liste des Tableaux :**

Tableau I.1 : Les différents types de pile à combustible. ....	23
Tableau II.1 : Valeurs d'enthalpie et d'entropie standard à une température de 298.15K des produits et réactants de la réaction chimique d'une PEMFC. ....	42
Tableau III.1 : Caractéristique électrique de la cellule dans les conditions standards $T=25^{\circ}\text{C}$ , $G=1000\text{W}/\text{m}^2$ .....	57
Tableau III.2 : Paramètres physiques de PEM. ....	60



## Nomenclature

PAC	Pile A Combustible.
PV	Photovoltaïque
PEMFC	Pile à combustible à membrane d'échange de protons.
MPPT	Maximum Power Point Tracking
STEP	stations de transfert d'énergie par pompage
PEM	Proton Exchange Membrane
DC/DC	Convertisseur Courant continu/ Courant continu
DC/AC	Convertisseur Courant continu/ Courant Alternatif
O <sub>2</sub>	L'oxygène
H <sub>2</sub>	Hydrogène
Li-ion	Lithium Ion.
CO <sub>2</sub>	Le dioxyde de carbone.
H <sub>2</sub> O	L'eau.
I <sub>cc</sub>	le courant de court-circuit
V <sub>co</sub>	la tension de circuit ouvert
V	Tension par cellule (V)
CC	Courant Continu
AC	Courant Alternatif
I <sub>ph</sub>	Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident)
I <sub>d</sub>	Courant circulant dans la diode
V <sub>d</sub>	la tension à travers la diode.
V <sub>m</sub>	Tension optimale (max).
I <sub>s</sub>	Le courant de saturation inverse

$V_t$	Tension thermique.
$q$	Charge de l'électron ( $1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$ ).
$K$	Constant de Boltzman ( $1,38 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$ )
$A_0$	le facteur de non-idéalité de la jonction.
$I_0$	Courant de saturation de la diode.
$R_{sh}$	la résistance shunt.
$E_{ref}$	Eclairement de référence ( $1000 \text{ W/m}^2$ )
$T$	Température de la jonction des cellules PV (K)
$V_{bat}$	La tension de la batterie.
$I_{bat}$	Le courant de la batterie.
$E_b$	La force électromotrice d'une cellule de la batterie
$R_{bat}$	La résistance interne.
$C_{bat}$	La capacité de la batterie.
$Q_{bat}$	La quantité de charge.
$EDC$	L'état de charge de la batterie.
$Q_{ech}$	La quantité de charge échangée.
$\eta_{charge}, \eta_{décharge}$	Les rendements Faradiques.
$R_b$	La résistance interne de la batterie.
$\Delta G^\circ$	Energie libre de la réaction d'électrolyse exprimé en(j/mol).
$\Delta H$	Enthalpie de la réaction d'électrolyse exprimée en (J/mol).
$F$	Constante de Faraday (C/mol).
$n$	Nombre d'électrons échangés lors de la réaction.
$\Delta E$	La tension thermomètre
$N$	Nombre de cellules de la pile
$\Delta G$	Variation d'enthalpie libre appelée énergie libre de Gibbs
$j_0$	Densité de courant d'échange de la cellule.

Vohm            Polarisation Ohmique

P\*H2            Pressions partielles à l'interface de l'hydrogène (atm).

P\*O2            Pressions partielles à l'interface de l'oxygène (atm).

$\xi_1$ ,  $\xi_2$ ,  $\xi_3$  et  $\xi_4$     coefficients paramétriques appropriés à chaque modèle physique de PAC

## SOMMAIRE :

Résumé

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Introduction générale.....1

### Chapitre I : Généralités sur les systèmes hybrides

I.1.Introduction.....3

I.2. Classification.....4

I.3.Energie Photovoltaïque.....4

I.3.1.Panneau photovoltaïque.....5

I.3.2. Principe de fonctionnement.....5

I.3.3.Différentes type des cellules photovoltaïques.....6

I.3.3.1.Cellules monocristallines.....6

I.3.3.2.Cellules poly-cristallines.....6

I.3.3.3. Cellules amorphes.....6

I.3.4. Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque.....7

I.3.5.Rayonnement en Algérie.....8

I.4.Système de stockage.....8

I.4.1.Les Batteries Solaires.....9

I.4.2.Principe de fonctionnement.....9

I.4.3.La batterie Lithium Ion .....10

I.4.3.1.Le principe de fonctionnement d'une batterie Li-ion.....10

I.4.3.2.Charge.....	12
I.4.3.3.Décharge.....	12
I.4.3.4.Durée de vie des batteries Lithium Ion.....	12
I.4.4.Stockage par systèmes hydrauliques.....	13
I.4.5.Couplage avec un stockage de gaz naturel.....	13
I.4.6.Stockage sous forme thermique.....	13
I.4.7.Stockage sous forme d'hydrogène.....	13
I.5.L'hydrogène.....	14
I.5.1.Caractéristiques de L'Hydrogène.....	14
I.5.2.Les majors méthode de production d'hydrogène.....	15
I.5.3.Les modes de production d'hydrogène.....	15
I.5.4.Production de l'hydrogène à partir de l'électrolyse.....	16
I.6.L'électrolyseur.....	16
I.6.1.Technologies des électrolyseurs.....	17
I.6.1.1. Electrolyseurs PEM.....	17
I.6.1.2. Électrolyse alcaline.....	18
I.6.1.3. Électrolyse à haute température.....	19
I.7.Relation entre hydrogène et la pile à combustible.....	20
I.8.Pile à combustible.....	20
I.8.1.Historique des piles à combustibles.....	21
I.8.2.Description de la pile à combustible.....	21
I.8.3.Constituants de la pile à combustible.....	21
I.8.4.Principe de fonctionnement.....	22

<b>I.8.5.Les différents types de piles à combustible.....</b>	<b>23</b>
<b>I.9.Conclusion.....</b>	<b>24</b>

## **Chapitre II : Modélisation des éléments que constitue le système hybride**

<b>II.1.Introduction.....</b>	<b>25</b>
<b>II.2. Modèle d'une cellule photovoltaïque.....</b>	<b>25</b>
<b>II.2.1.Le Générateur photovoltaïque "réel" .....</b>	<b>27</b>
<b>II.2.2.Caractéristique <math>I_{pv}(V_{pv})</math> et <math>P_{pv}(V_{pv})</math> dans des conditions STC.....</b>	<b>28</b>
<b>II.2.2.1.Influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques du module Photovoltaïque.....</b>	<b>29</b>
<b>II.2.2.2.Influence de la température sur les caractéristiques du module photovoltaïque.....</b>	<b>30</b>
<b>II.3.La batterie.....</b>	<b>31</b>
<b>II.3.1.Description du modèle CIEMAT.....</b>	<b>31</b>
<b>II.3.2.Modélisation du rendement faradique.....</b>	<b>32</b>
<b>II.3.2.1.Rendement énergétique.....</b>	<b>33</b>
<b>II.3.3.Modélisation de la décharge de la batterie.....</b>	<b>33</b>
<b>II.3.4.Modélisation de la charge de la batterie.....</b>	<b>33</b>
<b>II.3.5.Modélisation de la surcharge de la batterie.....</b>	<b>34</b>
<b>II.4.Electrolyse.....</b>	<b>34</b>
<b>II.4.1.Tension réversible et tension thermoneutre.....</b>	<b>35</b>
<b>II.4.2.Rendement d'un électrolyseur.....</b>	<b>35</b>
<b>II.4.3.Le rendement faradique.....</b>	<b>36</b>
<b>II.4.4.Flux des gaz produit.....</b>	<b>36</b>

<b>II.5.La pile à combustible.....</b>	<b>38</b>
<b>II.5.1.Modélisation de pile à combustible.....</b>	<b>38</b>
<b>II.5.2.Tension réversible.....</b>	<b>38</b>
<b>II.5.2.1.Influence de la pression sur la tension réversible.....</b>	<b>39</b>
<b>II.5.2.2.Influence de la température sur la tension réversible.....</b>	<b>41</b>
<b>II.5.3.Caractéristiques de polarisation d'une pile à combustible PEMFC.....</b>	<b>43</b>
<b>II.5.3.1.La polarisation ohmique.....</b>	<b>44</b>
<b>II.5.3.2.La polarisation d'activation.....</b>	<b>46</b>
<b>II.5.3.2.1.La polarisation d'activation cathodique.....</b>	<b>47</b>
<b>II.5.3.2.2. La polarisation d'activation anodique.....</b>	<b>48</b>
<b>II.5.3.2.3.La polarisation d'activation.....</b>	<b>49</b>
<b>II.5.3.3.Polarisation de concentration.....</b>	<b>50</b>
<b>II.5.4.Schémas électrique équivalent d'une cellule de PAC en statique.....</b>	<b>50</b>
<b>II.5.5.Schéma électrique équivalent d'une cellule en dynamique.....</b>	<b>51</b>
<b>II.6.Les convertisseurs.....</b>	<b>52</b>
<b>II.6.1.Hacheurs (convertisseur DC-DC) .....</b>	<b>52</b>
<b>II.6.2.L'onduleur (convertisseur DC-AC) .....</b>	<b>53</b>
<b>II.7.Conclusion.....</b>	<b>54</b>
<b>Chapitre III : Simulation de gestion de l'énergie électrique.</b>	
<b>III.1.Introduction.....</b>	<b>54</b>
<b>III.2.Modèle Simulink de générateur PV.....</b>	<b>54</b>
<b>III.2.1.Les caractéristiques I(V) et P(V).....</b>	<b>56</b>
<b>III.2.2.Le Maximum Power Point Tracking (MPPT).....</b>	<b>57</b>
<b>III.2.3.Résultats de la simulation.....</b>	<b>58</b>

<b>III.3.Modèle Simulink de pile à combustible PEM.....</b>	<b>59</b>
<b>III.3.1.Résultats de la simulation du système à pile à combustible.....</b>	<b>60</b>
<b>III.3.1.1.Caractéristique courant-tension et courbe de puissance.....</b>	<b>61</b>
<b>III.4.Conclusion.....</b>	<b>65</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>66</b>
<b>Références Bibliographies.....</b>	<b>67</b>



# **Introduction générale**

### Introduction général :

Un système hybride est une combinaison intelligente de deux technologies ou plus, souvent des sources d'énergie différentes, travaillant ensemble pour optimiser l'efficacité énergétique et assurer une alimentation plus fiable. Par exemple, un système hybride peut intégrer des panneaux solaires avec des générateurs à pile à combustible, permettant ainsi de tirer parti des avantages respectifs de chaque technologie : les panneaux solaires captent l'énergie solaire pendant la journée, tandis que les piles à combustible fournissent une alimentation stable en l'absence de soleil. Cette approche flexible et adaptable est souvent utilisée pour répondre aux besoins énergétiques spécifiques, offrant une solution durable et efficace pour diverses applications, des installations résidentielles aux projets industriels complexes.

L'étude et la modélisation d'un système hybride autonome à base de pile à combustible à hydrogène et de panneaux photovoltaïques représentent une avancée significative dans le domaine des énergies renouvelables et de la technologie énergétique durable. Ce type de système combine deux sources d'énergie propres et renouvelables pour assurer un approvisionnement continu en électricité, souvent dans des environnements isolés ou éloignés du réseau électrique traditionnel.

Les piles à combustible à hydrogène sont des dispositifs électrochimiques qui convertissent directement l'hydrogène en électricité, produisant de l'eau comme seul sous-produit. Elles offrent une efficacité énergétique élevée et des émissions nulles lorsqu'elles utilisent de l'hydrogène produit à partir de sources renouvelables. Les panneaux photovoltaïques, quant à eux, convertissent l'énergie solaire en électricité à l'aide de cellules photovoltaïques, une technologie bien établie et largement utilisée pour sa fiabilité et son faible impact environnemental.

L'intégration de ces deux technologies dans un système hybride permet de tirer parti de leurs avantages respectifs : les panneaux solaires fournissent de l'électricité pendant la journée et par temps ensoleillé, tandis que la pile à combustible à hydrogène prend le relais lorsque l'énergie solaire n'est pas disponible, assurant ainsi une alimentation continue et fiable. Cette combinaison contribue à réduire la dépendance aux combustibles fossiles et à minimiser l'empreinte carbone, répondant ainsi aux exigences croissantes en matière de durabilité et de sécurité énergétique.

## Introduction générale

---

L'étude et la modélisation de ces systèmes visent à optimiser leur conception, leur efficacité et leur performance, en tenant compte des variations saisonnières et des fluctuations de la demande énergétique. Des modèles mathématiques et des simulations sont utilisés pour prédire le comportement du système dans différentes conditions et pour évaluer les stratégies de gestion énergétique optimales. Cela permet non seulement de dimensionner correctement les composants du système, mais aussi d'identifier les moyens d'améliorer son rendement global et sa fiabilité.

Ce travail a été organisé et structuré en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous proposons une vue d'ensemble des systèmes hybrides, ainsi qu'une présentation des diverses sources qui composent le système à étudier. Ce système comprend un générateur photovoltaïque, une pile à combustible, un électrolyseur et des batteries de stockage.

Le deuxième chapitre traite de la modélisation du système d'énergie hybride étudié, où chaque composant est représenté par un modèle mathématique spécifique.

Et dans le dernier chapitre, nous examinerons les résultats de simulation de générateur photovoltaïque et la pile à combustible.

Finalement, on conclue notre travail par une conclusion générale.

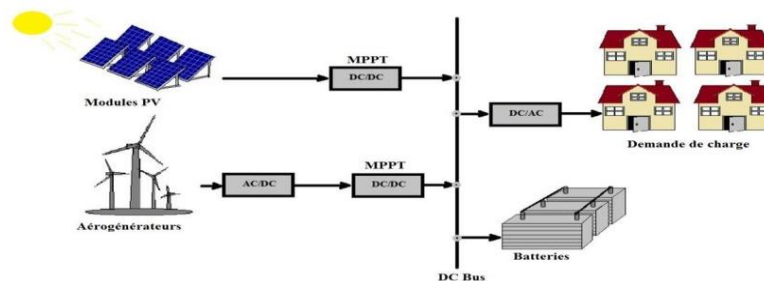
# **Chapitre I : Généralités sur les systèmes hybrides**

**I.1.Introduction :**

Le problème avec la puissance variable et non garantie produite par les sources d'énergie renouvelables, peut être résolu par un couplage des sources d'approvisionnement hybride. Un système d'énergie hybride est défini comme une installation qui utilise deux ou plus des technologies de la génération d'énergies. Leur association avec des sources différentes permet d'obtenir une production électrique continue. Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées [1].

Les systèmes hybrides présentent des avantages significatifs :

- Ils offrent une efficacité énergétique accrue en combinant différentes sources d'énergie, ce qui contribue à réduire la consommation globale d'énergie et les émissions polluantes.
- En outre, ils offrent souvent une plus grande autonomie et réduisent la dépendance aux combustibles fossiles, contribuant ainsi à la transition vers des modes de transport plus durables.



**Figure I.1** : Schéma synoptique du système d'énergie hybride.

Dans un système hybride, le modèle photovoltaïque joue un rôle central en captant l'énergie solaire et en la convertissant directement en électricité. Les panneaux solaires photovoltaïques utilisent des cellules photovoltaïques pour convertir la lumière du soleil en courant électrique continu. Ce modèle est particulièrement efficace dans les zones ensoleillées où il peut fournir une source d'énergie constante et renouvelable. L'intégration de ce modèle dans un système hybride permet une utilisation synergique avec d'autres sources d'énergie, telles que des batteries de stockage et des générateurs de secours, fournissant ainsi une source d'énergie plus stable, fiable et respectueuse de l'environnement.

## I.2. Classification :

Plusieurs systèmes hybrides sont réalisés selon différentes critères, Une généralisation des classifications les plus répandus sont illustrée sur la Figure ci-dessous [19].

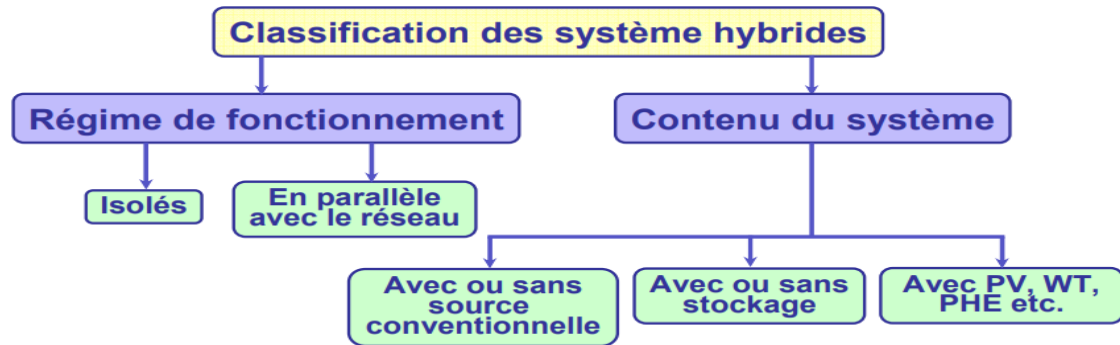


Figure I.2 : Classification des systèmes hybrides.

## I.3.Énergie Photovoltaïque :

L'énergie photovoltaïque est une forme d'énergie renouvelable obtenue en convertissant la lumière du soleil en électricité à l'aide de cellules photovoltaïques. Ces cellules sont généralement fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs tels que le silicium. Lorsque la lumière du soleil frappe les cellules photovoltaïques, elle excite les électrons dans le matériau semi-conducteur, créant ainsi un courant électrique.

L'énergie photovoltaïque est une source d'énergie propre et durable, car elle ne produit pas de polluants atmosphériques ni de gaz à effet de serre pendant son fonctionnement. Elle est également une forme d'énergie distribuée, ce qui signifie qu'elle peut être générée localement là où elle est consommée, réduisant ainsi les pertes dans le réseau de distribution.

Les panneaux solaires photovoltaïques peuvent être installés sur les toits des bâtiments, sur les terrains vagues, ou même intégrés dans des structures comme les auvents de parking. Ils sont de plus en plus utilisés pour fournir de l'électricité aux foyers, aux entreprises et aux infrastructures, contribuant ainsi à réduire la dépendance aux combustibles fossiles et à atténuer les impacts du changement climatique.

### I.3.1. Panneau photovoltaïque :

Le panneau solaire est composé de plusieurs cellules. Les cellules sont réalisées à partir de deux couches de silicium, une dopée P (en général dopée au bore) et l'autre dopée N (en général dopée au phosphore). Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule [2].

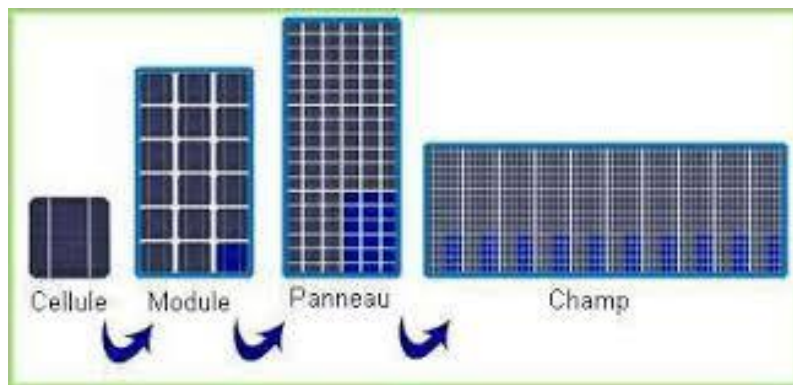


Figure I.3 : Cycle photovoltaïque.

### I.3.2. Principe de fonctionnement :

L'énergie solaire photovoltaïque est obtenue grâce au phénomène physique appelé l'effet photovoltaïque. Rapporté par Edmond Becquerel en 1839, le principe est assez simple et consiste en l'émergence d'une différence de potentiel aux extrémités d'une structure de matériel semi-conducteur, produit par l'absorption de la lumière [2].

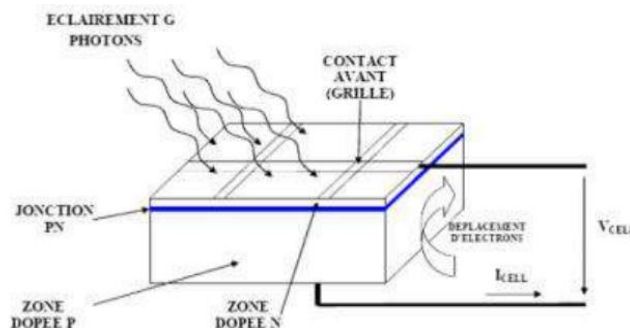


Figure I.4 : Illustration d'une cellule photovoltaïque.

### I.3.3. Différentes type des cellules photovoltaïques :

Trois technologies principales de cellules photovoltaïques existent :

#### A. Cellules monocristallines

Ces cellules sont les plus proches du modèle théorique. Elles sont composées d'un seul cristal divisé en deux couches, et permettent d'obtenir de hauts rendements, de l'ordre de 15 à 22 % [3].



**Figure I.5 :** Cellules photovoltaïques monocristallines.

#### B. Cellules poly-cristallines :

Elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en plusieurs cristaux dont les orientations sont différentes. On les prépare en sciant en couches minces un bloc de silicium coulé. Elles ont un éclat brillant nacré bleu-gris (multicolore) [3].



**Figure I.6 :** Cellules photovoltaïques poly-cristalline.

#### C. Cellules amorphes :

Ces cellules sont composées d'un support en verre ou en matière synthétique sur lequel est disposé une fine couche de silicium (l'organisation des atomes n'est plus régulière comme dans un cristal). Elles ont une surface uniformément sombre [3].



**Figure I.7 :** Cellules photovoltaïques amorphes.



L'énergie photovoltaïque présente des avantages indéniables. Tout d'abord, elle est propre et renouvelable, exploitant la lumière du soleil pour produire de l'électricité, ce qui réduit les émissions de gaz à effet de serre et contribue à la lutte contre le changement climatique. De plus, une fois les panneaux solaires installés, leur fonctionnement est silencieux et nécessite peu d'entretien. Ils peuvent être installés sur divers types de surfaces, des toits des maisons aux grands parcs solaires, offrant ainsi une grande souplesse d'utilisation.

Cependant, la production de cette énergie dépend de la disponibilité de la lumière solaire, ce qui peut conduire à une production variable en fonction des conditions météorologiques et du moment de la journée. En plus des frais initiaux et des coûts d'installation peuvent être élevés, bien que cela soit compensé par des économies à long terme sur les factures d'électricité.

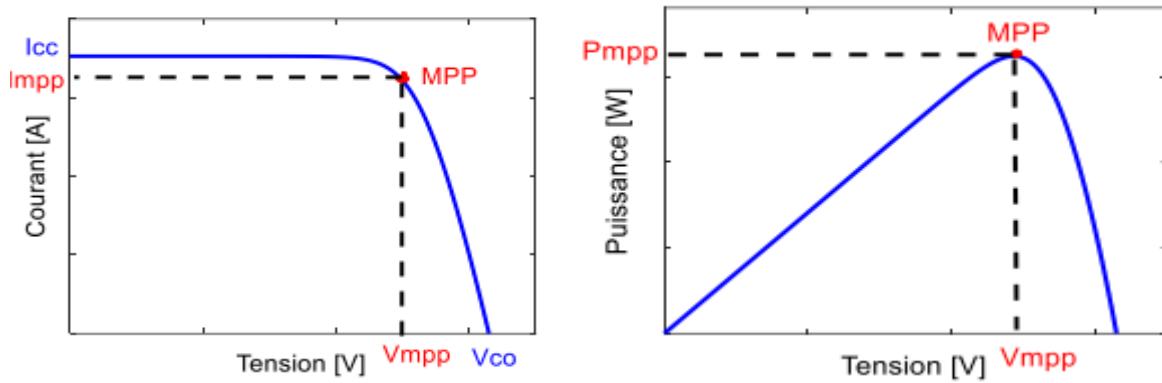
En effet, l'utilisation d'un générateur photovoltaïque pose quelques problèmes, notamment le caractère fluctuant, aléatoire, intermittent .... En effet, le système proposé doit être sécurisé incluant des systèmes de stockage : batterie, d'hydrogène. Le rôle des seconds producteurs d'énergie est de palier aux insuffisances éventuelles de la production photovoltaïque.

#### **I.3.4. Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque :**

Une cellule photovoltaïque est identifiée par des courbes caractéristiques électriques  $I(V)$  et  $P(V)$ . Ces courbes présentent, pour un éclairement et une température donnée, trois points remarquables :

- le courant de court-circuit  $I_{cc}$ ,
- la tension de circuit ouvert  $V_{co}$
- la puissance optimale qui est la puissance maximale  $P_{max}$  délivrée par les cellules photovoltaïques.

Donc pour extraire le maximum d'énergie des cellules photovoltaïques, il faut les faire fonctionner au point de puissance maximale [4].

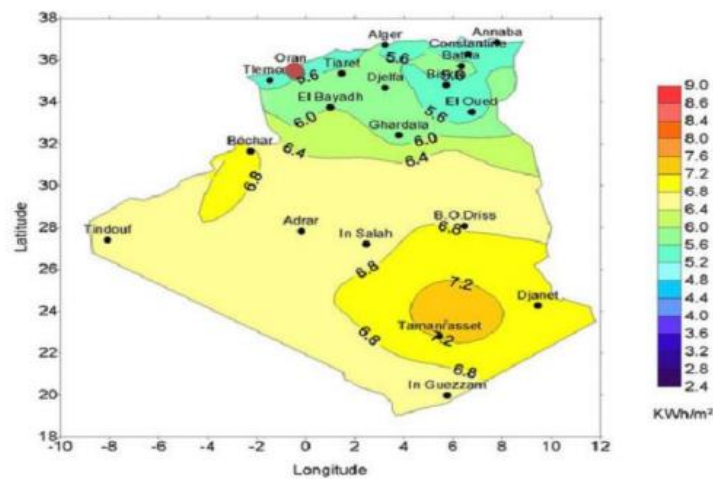


**Figure I.8 :** Caractéristiques I(V) et P(V) d'une cellule photovoltaïque avec ( $E=1000W/m^2$  et  $T=25^{\circ}C$ )

**I.3.5. Rayonnement en Algérie :**

L'Algérie possédant un gisement solaire important, de part son climat, la puissance solaire maximale en tout point de notre pays est d'environ 1KWh/m<sup>2</sup>. L'énergie journalière maximale moyenne (ciel clair, mois de juillet) dépasse les 6KWh/m<sup>2</sup> [24].

La figure ci-dessous représente les différentes zones énergétiques de l'Algérie.



**Figure I.9 :** Moyenne annuelle de l'énergie reçue en Algérie [25].

**I.4. Système de stockage :**

Stocker de l'énergie c'est garder une quantité d'énergie pour une utilisation future. Par extension, l'enjeu du "stockage d'énergie" est d'apporter de la flexibilité et de renforcer la

fiabilité des systèmes énergétiques. Il s'agit d'équilibrer l'offre et la demande en énergie, aussi bien pour la fourniture d'électricité que de chaleur ou de froid.

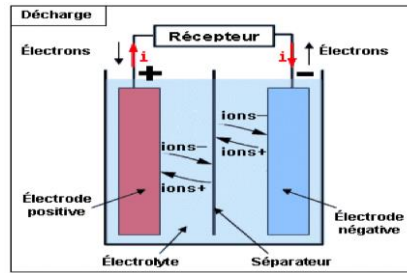
Aujourd'hui, la réponse aux « pointes » de consommation, c'est -à-dire la régulation de la demande d'électricité aux heures pleines. de forte demande, est principalement réalisée soit par l'importation d'électricité, le stockage stationnaire de l'énergie, aussi bien le stockage d'électricité que le stockage thermique, est associé au développement des énergies renouvelables en garantissant un courant de « qualité » sur le réseau de distribution.

#### **I.4.1. Les Batteries Solaires :**

Les batteries solaires, également appelées batteries de stockage solaire, sont des dispositifs de stockage d'énergie électrique utilisés dans les systèmes solaires photovoltaïques. Ils sont indispensables pour les installations solaires indépendantes ou les systèmes de secours en cas de coupure de courant.

#### **I.4.2. Principe de fonctionnement :**

Le fonctionnement fondamental d'une batterie de stockage implique la transformation de l'énergie électrique en énergie chimique pendant la phase de chargement, et inversement lors de la décharge. À l'intérieur de la batterie, des réactions électrochimiques se produisent entre les électrodes et l'électrolyte, permettant le stockage et la libération d'électrons. Lorsque la batterie est chargée, les électrons sont forcés de passer d'une électrode à l'autre, créant ainsi un potentiel électrique. Pendant la décharge, ce processus est inversé, générant un courant électrique pouvant être utilisé pour alimenter des appareils ou être réinjecté dans le réseau électrique. Ce fonctionnement permet aux batteries de stockage de jouer un rôle crucial dans le stockage d'énergie, l'optimisation de la consommation et l'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux électriques.



**Figure I.10 :** Schéma de principe d'une batterie.

Il existe quatre principaux types de batteries solaires utilisées pour stocker l'électricité produite par les installations photovoltaïques :

- les batteries au plomb (plomb ouvert, AGM et gel) et
- les batteries au lithium.

Parmi ces dernières, on va prendre comme exemple les caractéristiques de la batterie lithium

#### **I.4.3. La batterie Lithium Ion :**

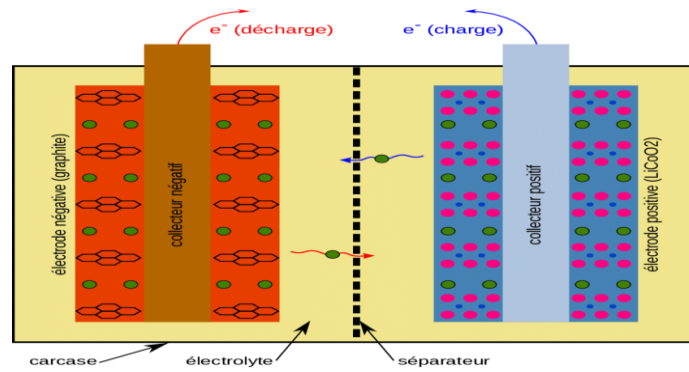
Ce type de batterie libère de l'électricité par échange réversible des ions Lithium entre deux électrodes : Anode négative en graphite et Cathode positive en oxyde métallique. Cet échange se fait au sein d'un électrolyte liquide où vont circuler les ions entre Anode et Cathode et composé d'un sel conducteur.

La batterie possède un film séparateur en polyéthylène ou en polypropylène qui sépare les substances chimiques de l'anode et de la cathode et ne laisse passer que les ions de lithium mobiles [5].

Elles sont également respectueuses de l'environnement et offrent une charge rapide. Cependant, elles présentent également des inconvénients, tels que le risque d'incendie, la sensibilité à la température et le coût initial supérieur [6,7].

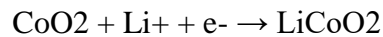
##### **I.4.3.1. Le principe de fonctionnement d'une batterie Li-ion :**

Les batteries lithium-ion fonctionnent grâce à l'échange d'ions de lithium entre les deux électrodes, l'anode et la cathode, via l'électrolyte. Lorsque la batterie se charge, les ions de lithium  $\text{Li}^+$  quittent l'électrode positive (la cathode) et sont stockés dans l'électrode négative (l'anode). Quand elle se décharge, c'est-à-dire quand elle produit le courant électrique, les ions  $\text{Li}^+$  font le mouvement inverse. Cette technique permet à la batterie de stocker et d'accumuler l'énergie électrique pour la restituer [8].



**Figure I.11** : Schéma de principe de la batterie lithium-ion.

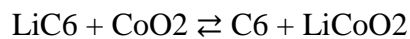
Des réactions de réduction-oxydation (redox) ont lieu à l'intérieur d'une batterie lithium-ion. La réduction a lieu du côté de la cathode. Là, l'oxyde de cobalt se combine aux ions de lithium pour former de l'oxyde de lithium et de cobalt (LiCoO<sub>2</sub>). Cela donne la demi-réaction suivante :



L'oxydation a lieu de côté de l'anode, le composé d'intercalation de graphite (LiC<sub>6</sub>) forme du graphite (C<sub>6</sub>) et des ions de lithium. Cela donne la demi-réaction suivante :



Et voici la réaction complète (de gauche à droite = décharge, de droite à gauche = charge) :



Les batteries au lithium-ion offrent de nombreux avantages :

- notamment une densité énergétique élevée, ce qui signifie qu'elles peuvent stocker beaucoup d'énergie dans un espace relativement réduit.
- Elles sont également légères, ce qui les rend idéales pour une utilisation dans de nombreux dispositifs portables tels que les smartphones et les ordinateurs portables.
- Elles ont une faible autodécharge, ce qui signifie qu'elles conservent leur charge pendant de longues périodes sans nécessiter de recharge fréquente.

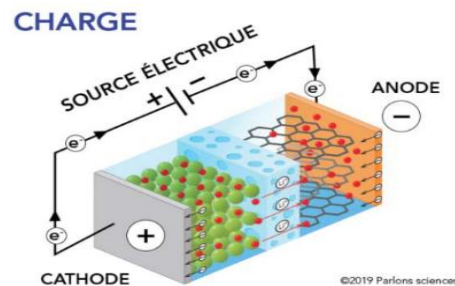
Elles présentent également des inconvénients :

- une durée de vie limitée, qui diminue avec chaque cycle de charge et de décharge.

- Elles peuvent être sensibles aux températures extrêmes et
- peuvent présenter un risque d'incendie ou d'explosion en cas de surcharge, de court-circuit ou de dommages physiques.
- Enfin, leur fabrication nécessite l'utilisation de matériaux coûteux et parfois rares, ce qui peut entraîner des problèmes environnementaux et éthiques.

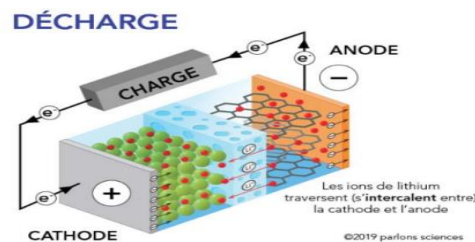
#### I.4.3.2.Charge :

Aussi longtemps que les ions de lithium se déplacent d'une électrode à l'autre, il y a un flux constant d'électrons. Étant donné que le cycle peut se répéter des centaines de fois, on dit que ce type de batterie est rechargeable [9].



#### I.4.3.3.Décharge :

Le processus s'inverse lorsqu'on recharge la batterie. Les ions de lithium se déplacent de la cathode à l'anode, tandis que les électrons se déplacent de l'anode à la cathode [9].



#### I.4.3.4.Durée de vie des batteries Lithium Ion :

La durée de vie des batteries lithium-ion dépend de plusieurs facteurs, notamment leur utilisation, leur entretien et les conditions environnementales. En général, une batterie lithium-ion peut supporter entre 500 et 1000 cycles de charge et de décharge, avec une durée de vie moyenne de 10 ans si elles sont correctement entretenues.

Il est important de noter que la durée de vie des batteries lithium-ion peut varier en fonction de la manière dont elles sont utilisées et entretenues, ainsi que de leur conception spécifique.

Il existe différentes méthodes pour emmagasiner l'électricité générée par les panneaux solaires.

#### **I.4.4. Stockage par systèmes hydrauliques :**

Dans ces installations l'électricité disponible durant les heures creuses sert à comprimer de l'air avec un turbocompresseur. L'air comprimé est stocké dans des cavernes situées à grande profondeur. Le poids des terrains au-dessus de la caverne permet de résister à la pression de l'air. Pour récupérer l'électricité, l'air comprimé est dirigé vers une machine semblable à une turbine à gaz [27].

#### **I.4.5. Couplage avec un stockage de gaz naturel :**

En faisant des réserves d'eau dans le barrage, on accumule ainsi de l'énergie qui ne sera transformée en électricité qu'en fonction des besoins instantanés. Il est possible d'aller plus loin en utilisant l'électricité produite durant les heures creuses pour pomper de l'eau depuis la vallée et remplir à nouveau le barrage. On parle alors de Station de Transfert d'Energie par Pompage, ou STEP.

#### **I.4.6. Stockage sous forme thermique :**

On peut parfaitement imaginer de stocker l'électricité sous forme thermique. Pour ce faire, il faut : Transformer l'électricité en chaleur dans des résistances électriques. Stocker la chaleur produite dans des réfractaires. Transformer la chaleur en électricité grâce à une turbine à gaz.

#### **I.4.7. Stockage sous forme d'hydrogène :**

La pile à hydrogène est la dernière innovation en date. Au moyen du principe d'électrolyse de l'eau, décompose l'eau en dioxygène et dihydrogène grâce à un courant électrique. En effet, on distingue plusieurs avantages :

- capacité de stockage plus élevée (3 fois supérieure aux batteries au lithium domestiques classiques),
- absence de métaux polluants (comme le lithium),

- durée de vie supérieure (30 ans contre 15 ans),
- format plus compact, etc.

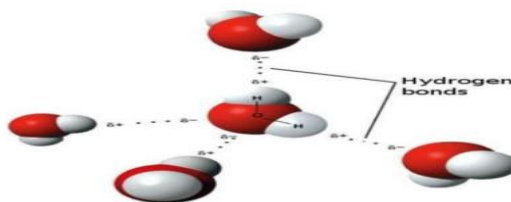
### I.5.L'hydrogène :

L'hydrogène, l'élément le plus simple de l'univers, présente plusieurs propriétés remarquables.

- il est léger et très inflammable, ce qui en fait un excellent combustible.
- il est capable de réagir avec la plupart des éléments, formant ainsi une multitude de composés.
- L'hydrogène est également très réactif chimiquement, notamment dans les conditions appropriées de température et de pression.
- De plus, il est le composant principal des étoiles et de nombreuses molécules organiques, telles que l'eau.
- Enfin, l'hydrogène existe sous plusieurs formes isotopiques, dont le deutérium et le tritium, qui sont utilisés dans certaines applications spécifiques, telles que la fusion Nucléaire.

#### I.5.1.Caractéristiques de L'Hydrogène :

Hydrogène (du grec « qui produit de l'eau »), élément de symbole H, incolore, inodore et insipide, de numéro atomique 1. On confondait l'hydrogène avec d'autres gaz, jusqu'à ce que le chimiste anglais Henry Cavendish démontre en 1766 que l'Hydrogène était produit par l'action de l'acide sulfurique sur les métaux. Le chimiste montra plus tard que l'hydrogène était une substance indépendante, qui se combinait avec l'oxygène pour former de l'eau. En 1781, le chimiste anglais Joseph Priestley nomma ce gaz « air inflammable » et le chimiste français Antoine Laurent de Lavoisier le renomma hydrogène [10].



**Figure I.12 :** Liaisons hydrogène dans l'eau.



### I.5.2. Les majors méthode de production d'hydrogène :

Le dihydrogène n'est pas une source d'énergie, mais un vecteur énergétique : il doit être produit avant d'être stocké et utilisé. Nous étudierons donc les possibilités envisageables pour sa production.

La production d'hydrogène à partir d'énergie solaire, également connue sous le nom d'hydrogène solaire, consiste à utiliser l'énergie solaire pour alimenter des électrolyseurs qui divisent l'eau en hydrogène et en oxygène [23].

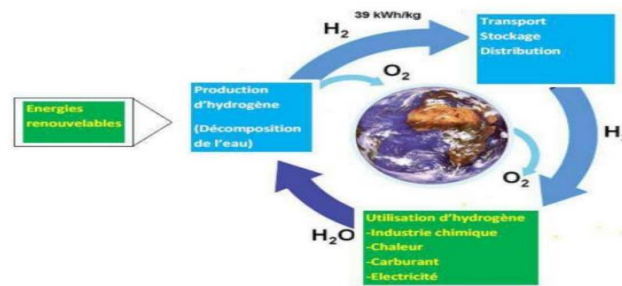


Figure I.13 : Cycle de l'hydrogène.

### I.5.3. Les modes de production d'hydrogène :

Les techniques de production consistent à extraire l'hydrogène H<sub>2</sub> de la ressource primaire.

- Le reformage du gaz naturel à la vapeur d'eau est la technique la plus répandue. Il s'agit de faire réagir du méthane avec de l'eau pour obtenir un mélange contenant de l'hydrogène et du CO<sub>2</sub>. Le CO<sub>2</sub> émis par ce procédé pourrait éventuellement être capté et stocké pour produire un hydrogène dé carboné.
- La gazéification permet de produire, par combustion, un mélange de CO et d'H<sub>2</sub> à partir de charbon (solution qui émet beaucoup de CO<sub>2</sub>) ou de biomasse.
- Une autre méthode utilise des composés organiques principalement constitués d'hydrogène et de carbone, comme le gaz naturel, le charbon ou la biomasse. Elle représente actuellement plus de 90% de la production d'hydrogène.
- Une autre filière utilise les énergies renouvelables comme l'énergie solaire et l'énergie éolienne (la lumière du Soleil et la force de vent).

- L'hydrogène peut également être produit via la production biologique par des algues, par réduction chimique, ou encore par la chaleur (thermolyse).
- L'hydrogène peut aussi être produit à partir l'énergie nucléaire [11].
- La production de l'hydrogène par décomposition de l'eau. Elle utilise soit un courant électrique pour l'électrolyse, soit une succession de réactions chimiques pour les cycles thermochimiques qui permettent de « casser » les molécules d'eau afin d'obtenir de l'hydrogène

#### **I.5.4. Production de l'hydrogène à partir de l'électrolyse :**

La production d'hydrogène par la technique d'électrolyse est actuellement très intéressante, car elle utilise une source d'énergie non productrice de gaz à effet de serre et renouvelable (module photovoltaïque). De plus, elle reste la technique de base pour fournir aux applications qui exigent de petits volumes d'hydrogène de grande pureté, notamment l'industrie des semi-conducteurs et de l'alimentaire [29].

#### **I.6.L'électrolyseur :**

Un électrolyseur est l'appareil inverse de la pile à combustible. L'électrolyseur dispositif qui génère de l'hydrogène, est une cellule électrolytique qui est alimentée par un courant électrique provenant d'une source externe (system hybride). Il décompose l'eau en hydrogène et oxygène lorsqu'il est électriquement aliment afin de produire la réaction d'oxydo-réduction électrochimique. Les électrolyseurs à membrane ont de mauvaises performances de cellules Par contre, leur contrôle est plus simple. Il est préférable d'utiliser un électrolyseur haute pression afin d'éviter l'utilisation d'un compresseur énergivore pour réduire la taille de l'unité de stockage de gaz [12].

Dans l'anode apparaissent des atomes d'oxygène, des protons et des électrons ; tandis que dans la cathode se produit une réaction de réduction dans laquelle les protons ( $H^+$ ) forment avec les électrons des molécules d'hydrogène gazeux [13].

Les pièces qui constituent un électrolyseur sont les suivantes :

- deux plaques qui fonctionnent comme anode et cathode ;
- deux mailles qui distribuent le courant électrique ;
- deux diffuseurs de gaz
- les électrodes à membrane (MEA), c'est-dire la structure principale de l'électrolyseur [12].

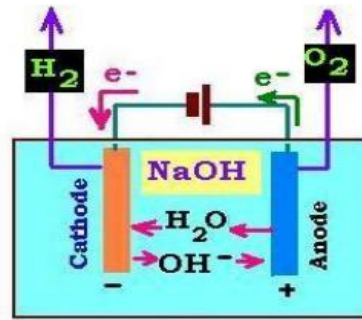


Figure I.14 : principe de l'électrolyseur.

Les principaux aspects de l'utilisation des électrolyseurs sont qu'ils pourraient être couplés à une source d'énergie renouvelable et diminuer ainsi l'émission de contaminants atmosphériques [14].

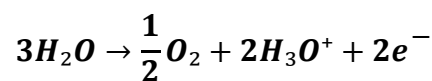
### I.6.1. Technologies des électrolyseurs :

On distingue :

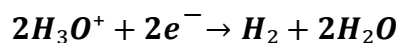
#### I.6.1.1. Electrolyseurs PEM :

Le principe de fonctionnement d'un électrolyseur PEM (Proton Exchange Membrane) est fondé sur le même concept qu'une pile à combustible PEM. La principale caractéristique de l'électrolyseur PEM est son électrolyte solide, constitué d'une membrane polymère. Il assure ainsi la conduction des ions hydronium ( $H_3O^+$ ) produits à l'anode et permet la séparation des gaz produits ( $H_2$  et  $O_2$ ) [20], selon les réactions ci-dessous :

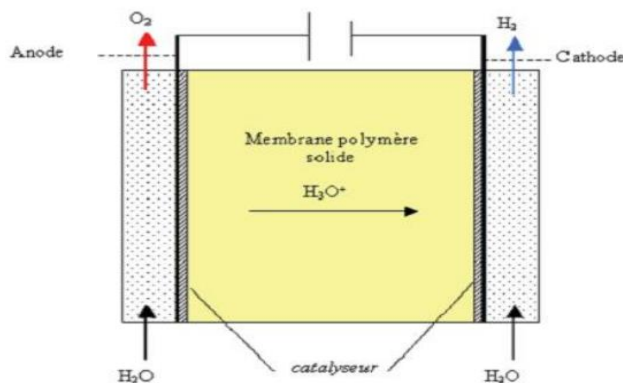
À l'anode :



À la cathode :



Le principe de l'électrolyse PEM est décrit schématiquement par la figure I.14 suivante :



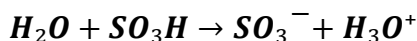
**Figure I.15** : principe schématique- de l'électrolyse PEM.

Les performances de l'électrolyseur PEM dépendent essentiellement des caractéristiques de la membrane et des catalyseurs utilisés. Ces deux composants constituent encore aujourd'hui les principaux verrous technologiques de l'électrolyse PEM [15].

L'anode est constituée d'un composite graphite-PTFE collé à un treillis métallique en laiton, le collecteur de courant étant composé pour sa part de titane. Le catalyseur est constitué d'oxydes de métaux nobles à base de ruthénium (Ru) et d'iridium (Ir).

La cathode est constituée de graphite poreux avec un dépôt catalytique de platine ou d'oxyde métallique. Mais le coût du platine étant élevé, les recherches actuelles visent à remplacer ce catalyseur.

L'électrolyte de l'électrolyseur PEM joue à la fois le rôle de conducteur protonique et de diaphragme. Il est constitué d'une membrane composée de fluor polymère solide comprenant des groupements acides sulfoniques ( $SO_3H$ ). Ces groupes se transforment aisément en leur base conjuguée, selon la réaction suivante, sous l'action d'un champ électrique :



La membrane joue donc le rôle d'un conducteur protonique puisque la migration des ions  $H^+$  est assurée par la transformation des groupements sulfoniques en ions  $SO_3^-$ . Elle nécessite d'être constamment humidifiée sous peine de voir sa conductivité diminuer [20].

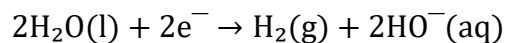
### I.6.1.2.Électrolyse alcaline :

L'électrolyse alcaline est la technique la plus répandue pour la production de dihydrogène électrolytique (figure I.15). Les solutions aqueuses utilisées dans la pratique sont

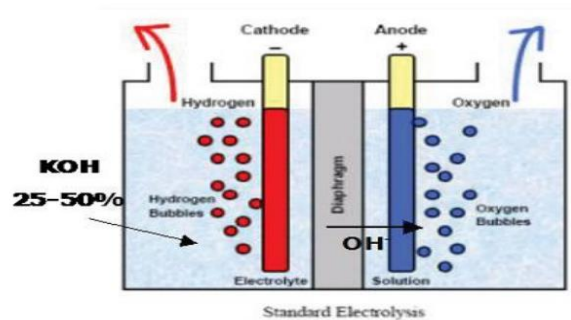
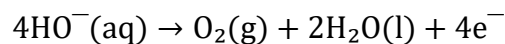
basiques car les solutions acides de concentration suffisante pour présenter une bonne conductivité posent des problèmes de corrosion.

L'électrolyte est une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium dont le titre massique est choisi selon la température pour obtenir la conductivité maximale (de 25 % à 80 °C jusqu'à 40 % à 160 °C). L'hydroxyde de potassium a une plus grande conductivité que l'hydroxyde de sodium et contient moins d'impuretés. Les électrodes sont en nickel avec un dépôt catalytique d'alliages de nickel. Un diaphragme placé entre les deux électrodes sépare le dihydrogène du dioxygène, tout en permettant le passage des ions [21].

À l'électrode négative, qui joue le rôle de cathode, l'eau est réduite :



À l'électrode positive, qui joue le rôle d'anode, les ions hydroxyde sont oxydés :



**Figure I.16** : Schéma de principe de l'électrolyse alcaline [22].

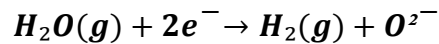
Les ions  $\text{K}^+$  ne participent pas aux réactions. Les ions hydroxyde sont consommés à l'anode et formés à la cathode en même nombre.

Les électrolyseurs industriels fonctionnent à des températures comprises entre 80 °C et 90 °C et sous une pression de 0,1 à 3 MPA. L'utilisation de températures supérieures fait l'objet de recherches.

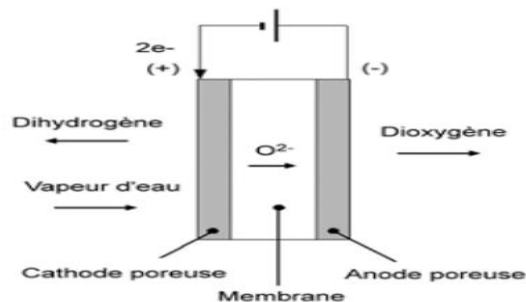
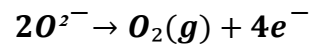
### I.6.1.3. Électrolyse à haute température :

L'électrolyse à haute température utilise comme électrolyte solide une membrane en céramique comme l'oxyde de zirconium (figure I.3). Le dispositif travaille des températures

comprises entre 800 °C et 1 000 °C. L'électrode positive poreuse de l'électrolyseur est alimentée en vapeur d'eau. Les molécules d'eau y sont dissociées [21] :



Les ions oxyde ( $O^{2-}$ ) diffusent à travers l'électrolyte solide pour se recombiner sous forme de dioxygène à l'électrode négative tandis que le dihydrogène reste avec la vapeur d'eau à l'électrode positive :



**Figure I.17** : Schéma de principe de l'électrolyse à haute température [21].

L'électrolyse de l'eau à haute température est intéressante car l'énergie nécessaires apportée à la fois par le transfert thermique et par l'électricité. L'augmentation de température permet également de diminuer les surtensions d'électrodes. L'électrolyse à haute température permet d'atteindre un rendement élevé, mais elle est encore au stade du développement.

### I.7.Relation entre hydrogène et la pile à combustible :

L'hydrogène alimente la pile à combustible en fournissant l'énergie nécessaire pour produire de l'électricité de manière écologique, sans émission de polluants. Cette relation symbiotique entre l'hydrogène et la pile à combustible constitue une solution prometteuse pour répondre aux défis énergétiques actuels en offrant une alternative propre et durable aux combustibles fossiles.

### I.8.Pile à combustible :

La pile à combustible est un générateur d'énergie permettant de transformer directement l'énergie d'un combustible (hydrogène, hydrocarbure) en énergie électrique.

Cependant la pile à combustible nécessite l'apport d'un combustible pour fonctionner : l'hydrogène. Elle réalise donc une oxydation entre son carburant l'hydrogène et son comburant l'oxygène. Ce système n'émet aucun gaz à effet de serre et produit de l'eau ainsi que de l'électricité.

Grâce à cet avantage environnemental, l'utilisation de ce système est envisagée pour diverses applications d'alimentation de véhicules électriques propres, ainsi que la cogénération de chaleur et d'électricité [16].

### **I.8.1.Historique des piles à combustibles :**

La première pile à combustible datant de 1839 a été inventée par William Robert Grove. Dès 1932, ses travaux furent repris par Francis Thomas Bacon, qui mit au point les premiers prototypes de piles à dihydrogène. C'est réellement au début des années 1990 que les piles connaissent un regain d'intérêt. Cela est dû à un début de prise de conscience sur la nécessité de trouver des moyens de production d'énergie moins polluants, sur les réserves limitées en énergies fossiles et les incertitudes liées à leur approvisionnement, sur l'augmentation des besoins énergétiques à l'échelle mondiale et enfin sur l'intérêt d'une production d'électricité décentralisée. En 2014 : la Commercialisation de la 1re voiture particulière à PAC hydrogène [17].

### **I.8.2.Description de la pile à combustible :**

Les piles à combustible sont classées selon la nature de leur électrolyte, qui est un des principaux éléments de la pile. Il permet la mobilité des ions, détermine sa température et ses caractéristiques de fonctionnement. Cet électrolyte peut-être un acide dans le cas où des ions positifs (les protons  $H^+$ ) migrent de l'anode à la cathode, ou basique dans le cas inverse où se sont les ions négatifs qui se déplacent cette fois-ci de la cathode à l'anode (les anions  $OH^-$ ,  $O_2^-$  ou encore  $CO_3^{2-}$ ).

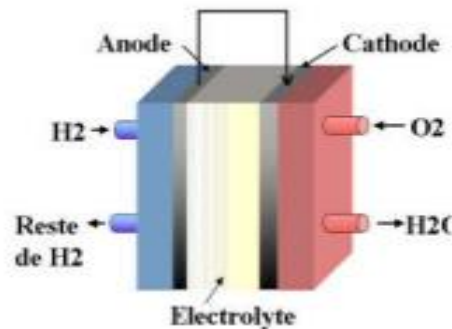
Dans le cas des piles à combustible avec électrolyte acide (pile à hydrogène « PEM » (Proton Exchange Membrane)), la membrane qui compose l'électrolyte est en polymère qui possède une épaisseur la plus fine possible 50-100  $\mu m$  doit conduire les protons hydrogène sans conduire les électrons [28].

### **I.8.3.Constituants de la pile à combustible :**

On distingue :

- Un électrolyte qui permet la conduction d'ions.
- une anode : lieu d'oxydation du combustible (comme l'hydrogène).
- une cathode où se produit la réduction de l'oxygène.
- des catalyseurs pour accélérer les réactions électrochimiques.
- des plaques bipolaires pour séparer les cellules et collecter le courant.
- des échangeurs de chaleur et de masse pour maintenir des conditions optimales.

Ces éléments permettent le fonctionnement efficace d'une pile à combustible en produisant de l'électricité avec de l'eau comme principal sous-produit.



**Figure I.18 :** Constitution général d'une pile à combustible.

#### I.8.4.Principe de fonctionnement :

La pile à combustible fonctionne sur mode inverse de l'électrolyse de l'eau. Ici, on supprime la source de tension, on alimente en hydrogène et oxygène et on constate l'apparition d'une tension électrique entre les deux électrodes : le dispositif deviendra un générateur électrique qui fonctionnera aussi longtemps qu'il sera alimenté.

Le combustible à base d'hydrogène  $H_2$  est amené sur l'anode.  $H_2$  va se transformer en ions  $H^+$  et libérer des électrons qui sont captés par l'anode. Les ions  $H^+$  arrivent sur la cathode où ils se combinent aux ions  $O_2$  constitués à partir de l'oxygène de l'air, pour former de l'eau. C'est le transfert des ions  $H^+$  et des électrons vers la cathode qui va produire un courant électrique continu à partir de l'hydrogène. Cependant cette tension ne dépasse pas 0,7 V par cellule ; il faut donc utiliser un grand nombre de cellules en série pour obtenir la tension requise. Le courant électrique produit par la pile est continu ; il est donc souvent nécessaire de placer en aval de la pile un onduleur permettant la transformation du courant continu en un courant alternatif.



Oxydation (anode):  $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$

Réduction (cathode) :  $\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$

Équation globale :  $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow \text{Electricité} + H_2O + \text{CHALEUR}$

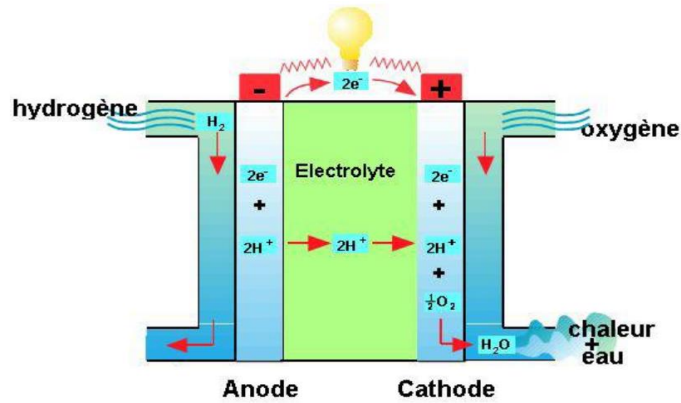


Figure I.19 : Principe de fonctionnement de piles à combustible.

**I.8.5. Les différents types de piles à combustible :**

Les piles à combustible sont couramment classées selon la nature de l'électrolyte qui détermine la température de fonctionnement optimale [18].

Acronyme	Nom	Température de fonctionnement	Electrolyte
PEMFC	Electrolyte Membrane Fuel Cell	50-80°C	Polymère
HT-PEMFC	High Température PEMFC	120-180°C	Polymère
DMFC	Direct Méthanol Fuel cell	25-50°C	Polymère
DCFC	Direct Ethanol Fuel Cell	25-50°C	Polymère
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell	700-1000°C	Céramiq
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell	650°C	Liquide
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell	150-200°C	Liquide
AFC	AFC Alkaline Fuel Cell	60-120°C	Liquide

Tableau I.1 : Les différents types de pile à combustible

Les piles à combustible offrent plusieurs avantages notamment :

- une efficacité énergétique élevée,
- une faible émission de polluants atmosphériques et
- une grande flexibilité d'utilisation, pouvant être alimentées par divers types de carburants.
- De plus, elles produisent de l'électricité de manière silencieuse et sont relativement légères, ce qui les rend idéales pour une utilisation mobile.

**I.9.Conclusion :**

Les systèmes hybrides associant les technologies photovoltaïques et les piles à combustible représentent une réponse innovante et prometteuse aux défis énergétiques contemporains. En combinant l'utilisation de l'énergie solaire renouvelable avec la conversion efficace de l'hydrogène en électricité propre, ces systèmes offrent une solution complète pour une alimentation énergétique durable et fiable. Ils contribuent à réduire la dépendance aux combustibles fossiles, à minimiser les émissions de gaz à effet de serre et à renforcer la résilience énergétique des communautés. L'avenir de ces technologies réside dans leur optimisation continue, leur intégration efficace dans divers environnements, et leur rôle essentiel dans la transition vers un avenir énergétique plus propre et plus durable.

# **Chapitre II : Modélisation des éléments que constitue le système hybride**

## II.1.Introduction :

La modélisation d'un système hybride combinant une pile à combustible (PAC) et un générateur photovoltaïque (PV) est essentielle pour optimiser sa performance et son efficacité. Ce type de système utilise les avantages des deux technologies : la production d'énergie solaire propre et renouvelable par le générateur PV, et la production d'énergie continue et stable par la pile à combustible. La modélisation permet de simuler le comportement du système sous diverses conditions d'exploitation, en tenant compte des variations de l'ensoleillement et de la demande énergétique.

En intégrant des modèles mathématiques pour chaque composant, tels que les cellules photovoltaïques, l'électrolyseur, la pile à combustible, les réservoirs de stockage d'hydrogène et les batteries, il devient possible de prévoir et d'optimiser les interactions entre ces éléments. Les outils de simulation, comme MATLAB/Simulink, offrent un environnement puissant pour analyser ces interactions et ajuster les paramètres du système. Cette approche aide à identifier les configurations optimales et à développer des stratégies de gestion de l'énergie, maximisant ainsi l'efficacité globale et la fiabilité du système hybride.

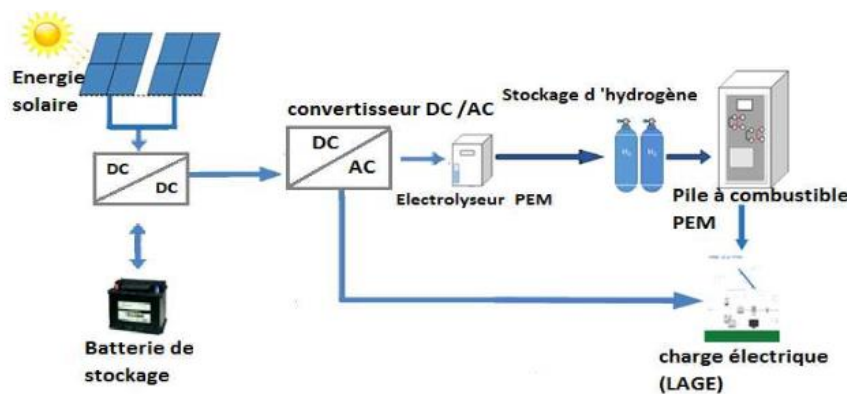


Figure II.1 : Le schéma global du système étudié

## II.2. Modèle d'une cellule photovoltaïque :

On peut simplifier la description d'une cellule photovoltaïque en la considérant comme une source de courant idéale qui génère un courant  $I_{ph}$  proportionnel à la puissance lumineuse reçue, en parallèle avec une diode représentant la jonction p-n de la cellule PV.

Les cellules solaires sont l'élément le plus fondamental du système photovoltaïque, elles convertissent l'énergie solaire en énergie électrique. Elles sont très similaires à la

Plupart des appareils électroniques à semi-conducteurs couramment utilisés tels que les diodes, et les transistors. La cellule solaire se compose essentiellement d'une jonction *PN* d'où une tension électrique est générée à la sortie. Le photo- courant (*I<sub>ph</sub>*) circulera à travers la charge connectée aux bornes de sortie d'une cellule Photovoltaïque [30].

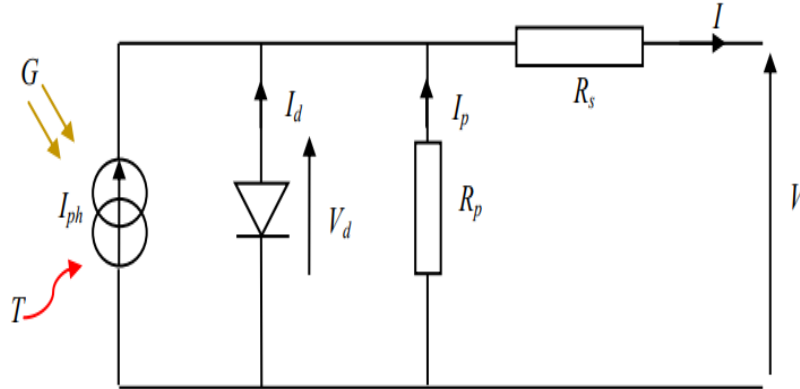


Figure II.2 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Lorsque nous connectons une charge résistive aux bornes de la cellule photovoltaïque, une partie du courant, *I* est fournie à la charge, tandis que le reste, *I<sub>D</sub>* circule à travers la diode. Cette relation peut être exprimée de la manière suivante :

$$I = I_{ph} - I_D \tag{II.1}$$

Pour un générateur photovoltaïque idéal, la tension à travers la résistance est équivalente à la tension à travers la diode.

$$V = V_D \tag{II.2}$$

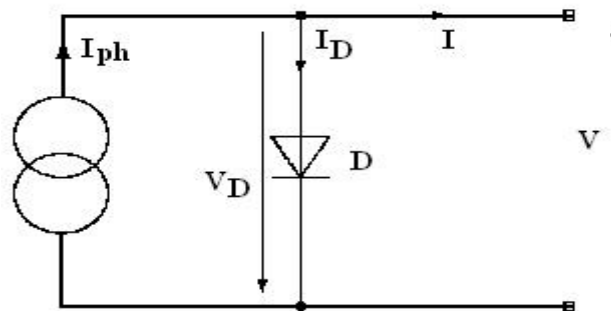


Figure II .3. Modèle simplifié d'une cellule PV.

Étant donné que la diode est un composant non linéaire, sa caractéristique courant-tension (*V-I*) est déterminée par la relation suivante :

$$I_D = I_s \left( \exp\left(\frac{V_D}{V_m}\right) - 1 \right) \tag{II.3}$$

Le courant de saturation inverse ( $I_s$ ) d'une diode peut être exprimé en fonction de la tension thermique ( $VT$ ), où  $VT=A_0 \cdot K \cdot T/q$ . Ici,  $T$  représente la température de la jonction en Kelvin,  $q$  est la charge de l'électron,  $k$  est la constante de Boltzmann, et  $A_0$  est le facteur de non-idéalité de la jonction. La tension aux bornes de la diode est notée  $V_D$ .

Le courant débité correspond à :

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_s \left( \exp\left(\frac{V_D}{V_m}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.4})$$

Ce modèle demeure purement théorique et ne reflète pas le comportement réel d'une cellule photovoltaïque dans des conditions pratiques. Cependant, il conserve sa validité dans certaines conditions spécifiques, à condition de ne pas tenir compte des pertes de tension, du courant de fuite, etc. D'autres modèles existent, également théoriques, mais offrant une représentation plus fidèle du fonctionnement de la cellule photovoltaïque.

### II.2.1. Le Générateur photovoltaïque "réel" :

La conversion directe de l'énergie solaire en énergie électrique est effectuée par la cellule photovoltaïque. Pour évaluer la puissance électrique du panneau photovoltaïque, on utilise un modèle à cinq paramètres. Ce modèle est polyvalent, car il peut être utilisé pour représenter une seule cellule solaire, un module photovoltaïque ou même un ensemble de modules. Une caractéristique remarquable de ce modèle est sa capacité à ajuster ses paramètres en fonction des données fournies par les fabricants. De plus, il peut prédire avec une précision d'environ 6% les performances des modules en silicium monocristallin et polycristallin.

$I_{ph}$  représente le courant photoélectrique proportionnel au rayonnement solaire incident sur la cellule  $G$ ,  $I_D$  est le courant de la diode, et  $I_0$  est le courant de saturation de la diode.

Le courant qui traverse la cellule est exprimé par l'équation suivante.

$$I = I_{ph} - (I_D + I_{sh}) \quad (\text{II.5})$$

Et

$$I_{sh} = \frac{(V + R_s * I)}{R_{sh}} \quad (\text{II.6})$$

D'après le modèle simplifié d'une cellule PV, on a :

$$I_D = I_s \left( \exp\left(\frac{V_D}{V_m}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.7})$$

D'après l'équation(7) la tension de la diode se calcule en fonction du courant et de la tension :

$$V_D = V + I * R_s \quad (\text{II.8})$$

En remplaçant l'équation (II.8) dans (II.7) on obtient :

$$I_D = I_s \left( \exp\left(\frac{V+I*R_s}{V_m}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.9})$$

Le courant qui traverse la résistance parallèle ( $I_s$ ), peut être exprimé en fonction de la tension de diode et la résistance parallèle

$$I = \frac{V_D}{R_{sh}} = \frac{V + I * R_s}{R_{sh}} \quad (\text{II.10})$$

Par la subtilisation des équations (II.8), (II.9) et (II.10) on trouve l'équation (II.11) :

$$I = I_{ph} - I_0 * \left[ \exp\left(\frac{V + I * R_s}{V_m}\right) - 1 \right] - \frac{V + I * R_s}{R_{sh}} \quad (\text{II.11})$$

On remplacer  $VT$  dans l'équation de courant :

$$I = I_{ph} - I_0 * \left[ \exp\left(q \frac{V + I * R_s}{A_0 K_m}\right) - 1 \right] - \frac{V + I * R_s}{R_{sh}} \quad (\text{II.12})$$

Les cellules PV, généralement considérées comme ayant la même caractéristique Où  $q$  représente la charge élémentaire,  $k$  est la constante de Boltzmann,  $R_s$  est la résistance en série, et  $R_{sh}$  est la résistance shunt.

### II.2.2.Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ dans des conditions STC :

Ils ont analysé le comportement des panneaux photovoltaïques dans ces conditions, en respectant les paramètres de fonctionnement d'intensité énergétique solaire.

$E_{sref} = 1000W/m^2$  et à température  $T_{jref} = 25C^\circ$

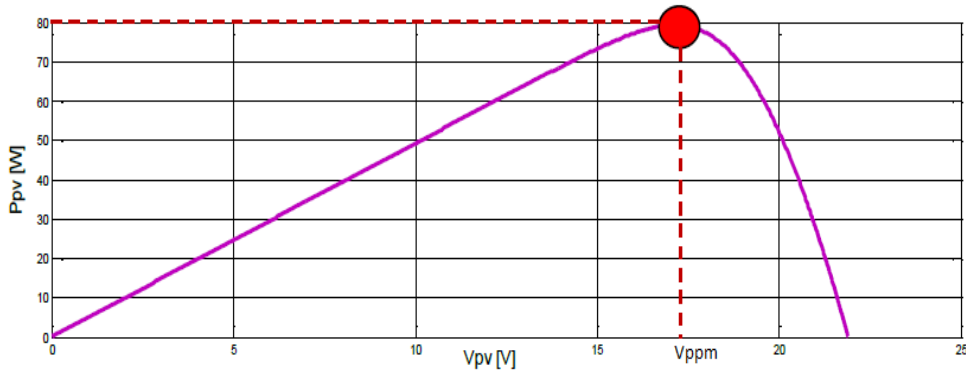


Figure II.4 : Caractéristique  $P_{pv}=f(V_{pv})$  dans les conditions standards.

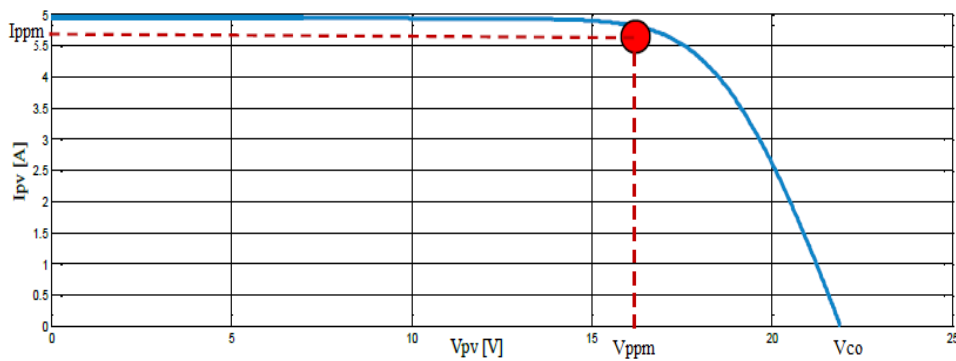


Figure II.5 : Caractéristique  $I_{pv}=f(V_{pv})$  dans les conditions standards.

### II.2.2.1. Influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques du module

#### Photovoltaïque :

Dans ce qui suit, les simulations ont été faites pour différentes valeurs d'ensoleillement ( $E_s=300, 500, 700, 1000\text{w/m}^2$ ) en maintenant la température constante  $T_{jref}=25^\circ\text{C}$ . Pour chaque ensoleillement nous déterminons la caractéristique courant/tension (Figure II.16) ainsi que pour la caractéristique puissance/tension (Figure II.17).

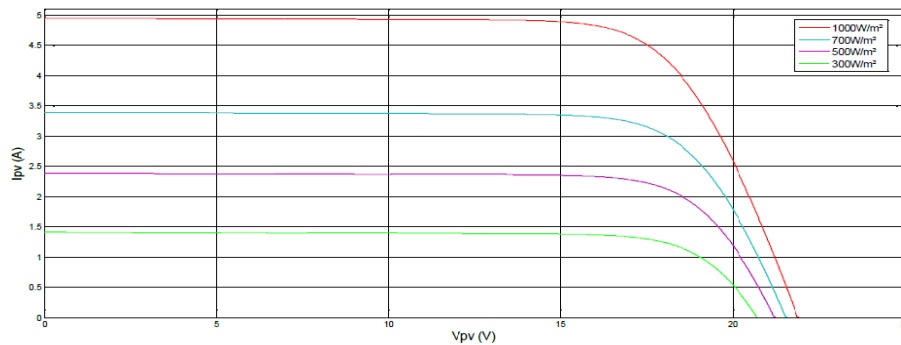


Figure II.6 : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique  $I_{pv}(V_{pv})$ .



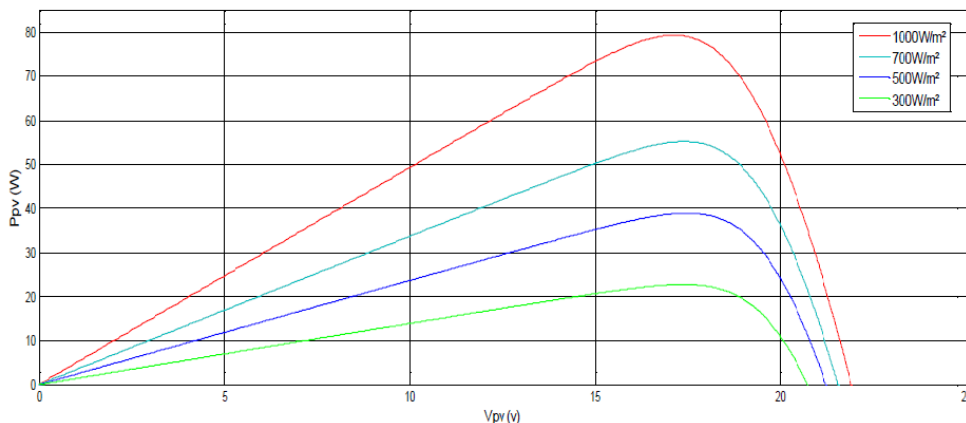


Figure II.7 : Influence de l’ensoleillement sur la caractéristique Ppv (Vpv).

Les conclusions tirées de cette variation sont les suivantes :

- Le courant de circuit-ouvert I<sub>co</sub> et la puissance varie proportionnellement à L’ensoleillement G.
- La tension à vide V<sub>co</sub> varie peu avec l’ensoleillement pouvant être considérée Comme une constante pour une installation donnée.

### II.2.2.2. Influence de la température sur les caractéristiques du module photovoltaïque :

D’autres tests en variant la température ambiante (T<sub>j</sub>=25, 40, 55, 70°C). Cela a donné lieu aux courbes suivantes.

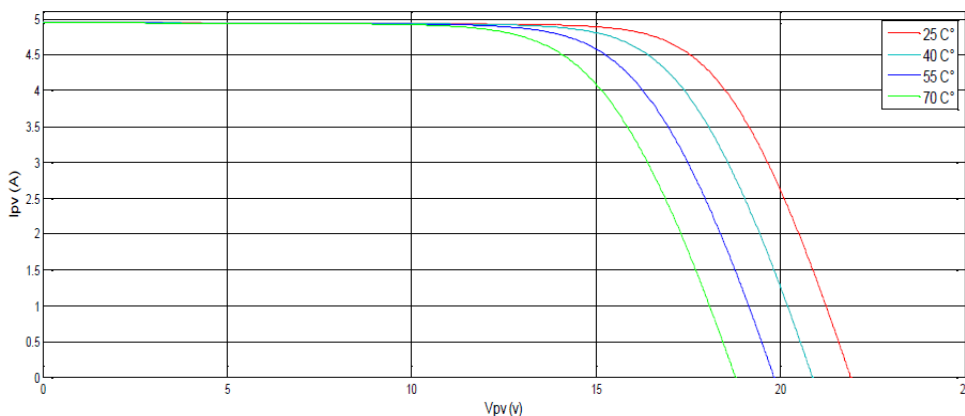
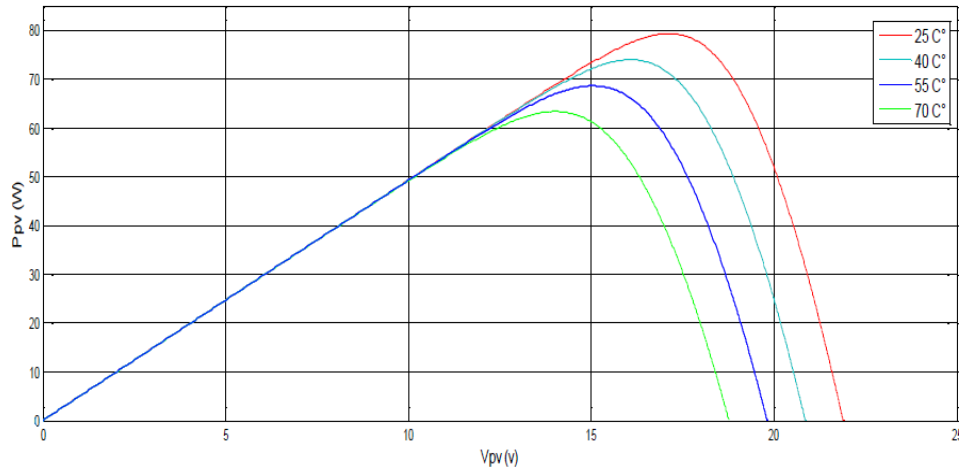


Figure II.8 : Influence de la température sur la caractéristique Ipv (Vpv).



**Figure II.9 :** Influence de la température sur la caractéristique Ppv (Vpv).

Les conclusions tirées de cette variation sont les suivantes :

- En faisant varier la température de 25°C à 70°C, nous remarquons que le courant de Court-circuit  $I_{cc}$  et la puissance Ppv est presque dépendant de la température.
- En revanche, la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  diminue lorsque la température Augmente.

### II.3.La batterie :

#### II.3.1.Description du modèle CIEMAT :

Ce modèle est basé sur un schéma électrique. Il définit la tension aux bornes de l'accumulateur en fonction de quelques paramètres tels que le courant imposé, son état de charge et sa température. Il tient compte du rendement faradique en charge pour calculer l'évolution de son état de charge, tout en intégrant la phase de dégazage (dégagement d'hydrogène) qui est un phénomène propre aux batteries au plomb, provoquant une importante élévation de la tension en fin de charge.

Les phénomènes d'autodécharge et de vieillissement n'ont pas été pris en compte.

Dans ce modèle, pour  $nb$  cellules en série, la tension aux bornes de la batterie est donnée ci-dessous :

$$V_{bat} = nb \times E_b \pm nb \times R_{bat} \times I_{bat} \quad (\text{II.13})$$

Ou  $V_{bat}$  et  $I_{bat}$  sont la tension et le courant de la batterie,  $E_b$  est la f.é.m. (force électromotrice) d'une cellule de la batterie et  $R_{bat}$  sa résistance interne.

La description du comportement de la batterie selon le modèle CIEMAT, nécessite trois équations correspondantes aux trois régimes de fonctionnements : le régime de décharge, le régime de charge et le régime de surcharge de la batterie.

L'ensemble de ces équations tient compte de l'expression normalisée de la capacité  $C_{bat}$  de la batterie. L'état de charge  $EDC$  de la batterie est fonction de la charge résiduelle et du régime de charge ou de décharge.

$$C_{bat} = \frac{1.67C_{10}}{1 + 0.67 \times \left(\frac{I_{bat}}{I_{10}}\right)^{0.9}} (1 + 0.005 \times \Delta T) \quad (II.14)$$

Avec :

$I_{10}$  : Courant nominal de la batterie (en A) donné par le constructeur ;

$C_{10}$  : Capacité nominale de la batterie (en Ah) en régime de décharge à courant constant durant 10 heures. Elle est donnée par le constructeur et elle est telle que :

$$C_{nom} = C_{10} = 10 \times I_{10} \quad (II.15)$$

$\Delta T$  : L'échauffement de la batterie par rapport à la température ambiante de 25°C. Il est supposé identique pour tous les éléments de la batterie.

L'état de charge de la batterie  $EDC$  est fonction de la capacité  $C_{bat}$  et de la Quantité de charge manquante à la batterie.

L'évolution temporelle de cette dernière, dépend du mode de fonctionnement

De la batterie, elle est définie par (II.16) :

$$Q_m = I_{bat} \times t \quad (II.16)$$

Où  $t$  est la durée de fonctionnement de la batterie avec un courant  $I_{bat}$ .

L'expression de l'état de charge de la batterie  $EDC$  est donnée par (II.17) :

$$EDC = 1 - \frac{Q_m}{C_{bat}} \quad (II.17)$$

La quantité de charge  $Q_{bat}$  à un instant  $t$ , s'obtient en fonction de la valeur du courant  $I_{bat}$ , des rendements Faradiques ( $\eta_{charge}$  et  $\eta_{décharge}$ ) et de l'état de charge  $EDC$  calculé à l'instant précédent  $Q_{t-1}$ , selon :

$$Q_{bat} = \begin{cases} Q_{t-1} + \eta_{charge} \times Q_{ech}(t) & \text{si } I_{bat} > 0 \\ Q_{t-1} + \eta_{décharge} \times Q_{ech}(t) & \text{si } I_{bat} < 0 \end{cases} \quad (II.18)$$

Où la quantité de charge échangée  $Q_{ech}$  est :

$$Q_{ech}(t) = \int_0^t I_{bat}(t) dt \quad (II.19)$$

### II.3.2. Modélisation du rendement faradique :

Pour le modèle CIEMAT, le rendement Faradique est pris en compte dans le cas de la charge et il est supposé égal à 1 en régime de décharge.

$$\eta_{décharge} = 1 \quad (II.20)$$

Le rendement Faradique en charge dépend du taux de charge, il a une valeur voisine de 100 % pour de faibles courants de charge et un faible état de charge. Puis, il se dégrade lorsque nous approchons de la pleine charge.

$\eta_{charge}$  est donné par la relation suivante :

$$\eta_{charge} = 1 - \exp \left[ \frac{20,73}{\frac{I_{bat}}{I_{10}} + 0,55} \cdot (EDC - 1) \right] \quad (II.21)$$

### II.3.2.1. Rendement énergétique :

La définition du rendement énergétique est analogue à celle du rendement faradique à la différence que les grandeurs mises en jeu sont des énergies et non des quantités de charge. Il est évalué sur un cycle d'utilisation de la batterie défini en puissance ou en courant pour lequel on calcule le rapport entre l'énergie fournie en décharge  $E_{dech}$  sur celle récupérée en charge  $E_{ch}$  :

$$\eta_e = \frac{E_{dech}}{E_{ch}} \quad (II.22)$$

### II.3.3. Modélisation de la décharge de la batterie :

En régime de décharge, la f.é.m. et la résistance interne sont déterminées par (II.23) et (II.24)

$$E_b - déch = 1,965 + 0,12 EDC \quad (II.23)$$

$$R_b - déch = R_{bat}$$

$$= \frac{1}{c} \left( \frac{4}{1 + |I_{bat}|^{0,3}} + \frac{0,27}{EDC^{1,5}} + 0,02 \right) (1 - 0,007\Delta T) \quad (II.24)$$

D'où l'expression de la tension de batterie, pour ce régime de décharge :

$$V_{bat} - déch = n_b \times E_b - déch - n_b \times R_b - déch \times |I_{bat}|$$

$$V_{bat} - déch = n_b \times (2,085 + 0,12 \cdot (1 - EDC)) - n_b \times \frac{I_{bat}}{C_{10}} \times (1 - 0,007\Delta T)$$

$$\times \left( 0,02 + \frac{4}{1 + (I_{bat})^{1,3}} + \frac{0,27}{(1 - EDC)^{1,5}} \right) \quad (II.25)$$

### II.3.4. Modélisation de la charge de la batterie :

En régime de charge et avant l'apparition du phénomène de "Gassing" (dégagement gazeux d'hydrogène et d'oxygène), la f.é.m. et la résistance interne sont déterminées par (II.25) et (II.26) :

$$E_b - char = 2 + 0,16 EDC \quad (II.26)$$

$$R_b - char = R_{char}$$

$$= \frac{1}{C_{10}} \left( \frac{6}{1 + |I_{bat}|^{0,86}} + \frac{0,84}{(1 - EDC)^{1,2}} + 0,036 \right) - 0,025\Delta T \quad (II.27)$$

D'où l'expression de la tension de la batterie avant la surcharge (II.28) :

$$V_{bat} - char = nb \times E_b - char - nb \times R_b - char \times I_{bat} \quad (II.28)$$

**II.3.5. Modélisation de la surcharge de la batterie :**

Pour ce régime de surcharge, l'expression de la tension de batterie est alors donnée par l'équation (II.28) :

$$V_{bat} - surch = nb \times V_g + nb \times (V_{ec} - V_g) \left[ 1 - \exp\left(\frac{t - t_g}{\tau_g}\right) \right] \quad (II.29)$$

Avec :  $t_g$  l'instant où commence le « gassing ». Ainsi  $(t - t_g)$  est la durée pendant laquelle s'opère le gassing. La constante de temps  $\tau_g$  s'exprime suivant :

$$\tau_g = \frac{1.73}{1 + 852 \times \left(\frac{I_{bat}}{C_{10}}\right)^{1.67}} \quad (II.30)$$

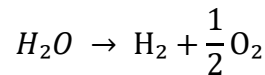
La tension de gassing  $V_g$  et la tension de fin de charge  $V_{ec}$  ont pour expression :

$$V_g = \left[ 2.24 + 1.97 \times \ln\left(1 + \frac{I_{bat}}{C_{10}}\right) \times (1 - 0.002 \times \Delta T) \right] \quad (II.31)$$

$$V_{ec} = \left[ 2.45 + 2.011 \times \ln\left(1 + \frac{I_{bat}}{C_{10}}\right) \times (1 - 0.002 \times \Delta T) \right] \quad (II.32)$$

**II.4. Electrolyse :**

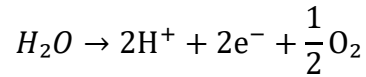
L'électrolyse est un procédé de décomposition chimique de l'eau en oxygène et hydrogène sous l'action d'un courant électrique (figure), selon la réaction :



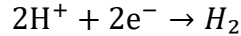
Etant donné que l'enthalpie de dissociation de l'eau est :  $\Delta H = 285$  kJ/mole, cette décomposition nécessite un apport d'énergie électrique, le potentiel théorique de la décomposition est de 1.481V à 298 K.



Dans le cas d'une membrane échangeuse de protons, les réactions sont les suivantes :  
 A l'anode, des électrons sont formés suite à l'oxydation de l'eau en oxygène et en protons (oxydation) :



A la cathode, les protons, passés à travers la membrane, se réduisent avec les électrons pour donner de l'hydrogène (réduction) :



Bien que l'électrolyse permette d'obtenir de l'hydrogène de grande pureté, cette technique coûte 3 à 4 fois plus chères que les autres procédés de fabrication de l'hydrogène étant donné le prix élevé de l'électricité.

#### II.4.1. Tension réversible et tension thermoneutre :

La tension minimale ou réversible ( $\Delta E^\circ$ ) d'une cellule d'électrolyseur correspond à l'énergie libre  $\Delta G^\circ$  nécessaire pour décomposer la molécule d'eau. Ces deux grandeurs sont reliées par la formule suivante :

$$\Delta G^\circ = n \cdot F \cdot (\Delta E^\circ)_{rev} \quad (II.33)$$

$\Delta G^\circ$  : énergie libre de la réaction d'électrolyse exprimé en (J/mol).

$F$  : constante de Faraday qui vaut: 96485 (C/mol).

$n$  : nombre d'électrons échangés lors de la réaction ( $n=2$  pour l'hydrogène).

La valeur de la tension minimale d'une cellule d'électrolyseur est :

$$\Delta E^\circ_{rev} = G^\circ / n \cdot F \quad (II.34)$$

La tension thermomètre ( $\Delta E^\circ$ )<sub>herm</sub> correspond au fonctionnement isotherme de l'électrolyseur, elle est donnée par la formule suivante :

$$\frac{\Delta H^\circ}{n \cdot F}$$

Avec :

$\Delta H$  : enthalpie de la réaction d'électrolyse exprimée en (J/mol).

$F$  : constante de Faraday (C/mol).

$n$  : nombre d'électrons échangés lors de la réaction.

#### II.4.2. Rendement d'un électrolyseur :

Le rendement énergétique est défini comme le rapport de l'énergie libéré par la réaction chimique sur l'énergie électrique consommée. Il est exprimé par la relation suivante :

$$V(gaz) \cdot PC(gaz) / V_{ELE} I_{ELE} t$$

Avec :

$V(gaz)$  : volume du gaz produit par électrolyse (hydrogène ou oxygène) ( $m^3$ ).

$PC$  : pouvoir calorifique du gaz ( $j/m^3$ )

$V_{ELE}$  : tension d'alimentation d'électrolyseur (V).

$I_{ELE}$  : courant entrant dans l'électrolyseur (A).

$t$  : temps de l'électrolyse (s).

#### II.4.3. Le rendement faradique :

Le rendement faradique est défini comme le rapport entre le volume réellement produit par l'électrolyseur et le volume théorique correspondant à la transformation totale des réactifs. Il est exprimé par la relation suivante :

$$\eta(\text{faradique})_{ELE} = \frac{V(\text{gaz})_{REEL} - V(\text{gaz})_{TH}}{V(\text{gaz})_{TH}} \cdot 100 \quad (\text{II.35})$$

Avec :

$(gaz)_{REEL}$  : volume réel produit par l'électrolyseur ( $m^3$ ).

$(gaz)_{TH}$  : volume théorique correspondant suivant la réaction chimique ( $m^3$ ).

#### II.4.4. Flux des gaz produit :

Le flux des gaz produits par un électrolyseur est directement proportionnel au courant et au rendement faradique, il est exprimé par la formule suivante :

$$Fg = nc \cdot I / nF \cdot \eta_{FE} \quad (\text{II.36})$$

Avec :

$Fg$  : flux de gaz (mol/s).

$nc$  : nombre de cellules.

$I$  : intensité qui alimente l'électrolyseur (A)

$\eta_{FE}$  : rendement faradique (%).

$n$  : nombre de moles d'électrons échangées par mole d'eau ( $n=2$  pour  $H_2$  et  $n = 4$  pour l'oxygène).

Il est possible de prévoir quel sera le volume de dihydrogène généré par la pile grâce à une formule très simple, la formule de Faraday.

$$V_{H_2} = \frac{R \times I \times T \times t}{F \times P \times 2} \quad (\text{II.37})$$

Avec

$R =$  Constante universelle des gaz parfaits  $= 8,314 \text{ J/mol/K}$

$I =$  Intensité (mA)

$T =$  Température (K)

$t =$  Temps (s)

$F =$  Constante de Faraday  $= 96\,485,3365 \text{ s.A/mol}$

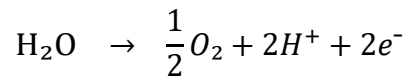
$P =$  Pression ambiante (Pa)

Il est possible de retrouver cette formule assez facilement. On suppose tout d'abord que  $H_2$  est un gaz parfait, ce qui nous donne :

$$P_{H_2} \times V_{H_2} = n_{H_2} \times R \times T \quad \Leftrightarrow \quad V_{H_2} = \frac{n_{H_2} \times R \times T}{P_{H_2}} \quad (\text{II.38})$$

Exprimons maintenant  $n_{H_2}$  sous une autre forme. On sait que à l'intérieur de l'électrolyseur se produit la réaction suivante :

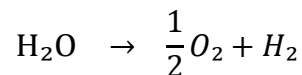
*Hydrolyse*



Donc pour chaque mole de  $H_2O$  consommée, il y a 2 moles d'électrons fournies.

De plus,

Hydrolyse



Donc il y a autant de mole de  $H_2O$  consommée qu'il y a de mole de  $H_2$  produite. Ainsi,

$$n_{H_2O} = n_{H_2O} \text{ consommé} = \frac{n_{\text{électron}}}{2} = \frac{Q}{2F} = \frac{I \times t}{2F}$$

Il ne nous reste plus qu'à remplacer l'expression de  $n_{H_2}$  dans l'équation des gaz parfaits ce qui nous donne bien :

$$V_{H_2} = \frac{R \times I \times T \times t}{F \times P \times 2}$$



La modélisation de l'hydrogène et celle de la pile à combustible sont intimement liées dans la recherche et le développement des technologies énergétiques durables. La modélisation de l'hydrogène, notamment son stockage, sa production et sa distribution, fournit des données cruciales pour concevoir des systèmes de piles à combustible plus efficaces et fiables. À son tour, la modélisation de la pile à combustible bénéficie de ces avancées en utilisant les informations sur la réactivité de l'hydrogène et les conditions optimales de fonctionnement. Cette synergie entre les deux domaines permet d'optimiser la performance globale des piles à combustible, ouvrant la voie à une transition énergétique plus propre et plus durable.

## **II.5. La pile à combustible :**

### **II.5.1. Modélisation de pile à combustible :**

Caractéristiques de polarisation d'une pile à combustible PEMFC comme mentionné précédemment, on peut distinguer sur la courbe de polarisation de la pile PEMFC, qu'on appelle également courbes caractéristique V-I, trois domaines différents,

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

Et chaque polarisation est une chute de tension dominante dans une région particulière de densité de courant (faible, moyenne, ou élevée) [33].

Le modèle développé ci-après, concerne une mono cellule. Il peut être appliqué par la suite à un stack de N cellule mises en série, en considérant que le courant du stack est le même que celui d'une cellule, et que sa tension est N fois la tension d'une cellule.

$$V = N \times V_{\text{cellule}} \quad (\text{II.39})$$

### **II.5.2. Tension réversible :**

Une cellule électrochimique de pile à combustible réalise la transformation d'une énergie chimique en une énergie électrique. Dans le cas théorique d'une réaction réversible, la relation entre les deux énergies est :

$$V_{rev} = -(\Delta G/nF) \quad (II.40)$$

Où :

$V_{rev}$  : Force électromotrice réversible (théorique) d'une cellule à l'équilibre.

F : Constante de Faraday

n : Nombre d'électrons échangés dans la réaction électrochimique élémentaire

(Dans notre cas n=2)

$\Delta G$  : L'énergie chimique transformée en énergie électrique, appelée « variation d'enthalpie libre » ou encore « variation d'énergie libre de Gibbs ».

### II.5.2.1. Influence de la pression sur la tension réversible :

La variation de l'énergie libre de Gibbs dépend des conditions de fonctionnement : température et pression.

Pour étudier l'influence de la pression, on suppose que la cellule fonctionne à la température standard (298.15K). Dans ce cas, la tension réversible est égale à la tension de Nernst.

L'influence de la pression sur la tension de Nernst est donnée par la loi de Nernst :

$$V_{Nernst} = V^0 + (RT/2F) \cdot \ln[(P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{0,5})/P_{H_2O} \cdot (1/P_o)^{0,5}] \quad (II.41)$$

Où :

$V^0$ : Tension réversible de la cellule aux condition standard de température et de pression (STP)

$P_{H_2}$  : Pression partielle de  $H_2$

$P_{O_2}$  : Pression partielle de  $O_2$

$P_{H_2O}$  : Pression partielle de  $H_2O$

R : Constante des gaz 8.3145 J K<sup>-1</sup>

T : Température de la cellule

En admettant que les pressions partielles de O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O sont en atmosphère, le terme 1/P<sub>0</sub> se réduit à 1.

Dans le cas des gaz parfait, l'activité est défini par :

$$a = \frac{P}{P_0} \quad (\text{II.42})$$

Où

*P*: Pression partielle du gaz

*P*<sub>0</sub>: Pression standard (1 atm)

La variation de l'énergie libre de Gibbs de formation est donnée par :

$$\Delta G = \Delta G_0 - RT \ln \left( \frac{a_{H_2} \cdot a_{O_2}^{0,5}}{a_{H_2O}} \right) \quad (\text{II.43})$$

Où

$\Delta G_0$  : Variation de l'énergie libre de Gibbs de formation par mole aux conditions standard de pression et de température.

R : Constante des gaz 8.3145 J K<sup>-1</sup>

T : Température de la cellule.

$a_{H_2}$  : Activité de l'hydrogène.

$a_{O_2}$  : Activité de l'oxygène

$a_{H_2O}$  : Activité de l'eau.

Des équations (II.42) et (II.42), on déduit que :

$$\Delta G = \Delta G^0 - RT \ln \frac{P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{0,5}}{P_{H_2O}} \quad (\text{II.44})$$

Sachant que  $V_0 = -\frac{\Delta G_0}{2F}$

On peut écrire :

$$V_{Nernst} = V_0 + \frac{RT}{2F} \ln \left[ \frac{P_{H_2} (P_{O_2})^{0,5}}{P_{H_2O}} \right] \quad (II.45)$$

Cette équation donne en fonction de la pression, la tension réversible à la température standard.

La plupart des modèles supposent que la totalité de l'eau produite est à l'état liquide et que sa pression est de 1atm. Dans ce cas, la tension réversible à la température standard est réduite à :

$$V_{Nernst} = 1.229 + (R \cdot T / 2 \cdot F) \cdot \ln(P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{0,5}) \quad (II.46)$$

On considère que les gaz se comportent comme des gaz parfaits (la totalité des modèles rencontrés dans la littérature émettent cette hypothèse)

### II.5.2.2. Influence de la température sur la tension réversible :

On peut définir pour, une pile à combustible qui est un système thermochimique, une grandeur nommée enthalpie et notée H pour une pression et une température données. La variation de cette grandeur  $\Delta H$  caractérise la « variation d'énergie chimique » du système thermochimique.

La seconde loi de la thermodynamique implique que l'on ne peut recueillir de la pile (qui est un système thermochimique) que « la variation d'enthalpie libre » :

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \quad (II.47)$$

La variation d'enthalpie  $\Delta H$  représente l'énergie chimique susceptible d'être transformée en énergie électrique. Le reste de cette variation, sous forme de chaleur, est représentée ici par le terme  $T\Delta S$ . Le terme  $\Delta S$  représentant la variation d'entropie du système.

Aux conditions normales de pression et de température, cette équation donne :

$$\Delta G_{298 \cdot 15K} = \Delta H_{298 \cdot 15K} - T \cdot \Delta S_{298 \cdot 15K} \quad (II.48)$$

Où :

$\Delta G_{298 \cdot 15K}$  : Variation de l'énergie libre de Gibbs aux conditions standard.

$\Delta H_{298 \cdot 15K}$  : Variation de l'enthalpie de formation aux conditions standard.

T : Température de la cellule (dans ce cas 298.15)

$\Delta S_{298.15K}$ : Variation de l'entropie aux conditions normales.

Le Tableau 01 présente les valeurs d'enthalpie et d'entropie standard, à une température de 298.15K, des gaz parfaits H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, et de l'eau H<sub>2</sub>O à l'état liquide.

	$\Delta H(J.mol^{-1})$	$\Delta S(J.mol^{-1}.K^{-1})$
H <sub>2</sub>	0	130.684
O <sub>2</sub>	0	205.138
H <sub>2</sub> O	$-285.83.10^3$	69.91

**Tableau II.1** : Valeurs d'enthalpie et d'entropie standard à une température de 298.15K des produits et réactants de la réaction chimique d'une PEMFC

De ces valeurs, on peut calculer les variations d'enthalpie et d'entropie lors de la réaction électrochimique se déroulant au sein d'une cellule de la pile :

$$\Delta H_{298.15K} = -85.83.103 J.mol^{-1}$$

$$\Delta S_{298.15K} = -163.343 J.mol^{-1}.K^{-1}$$

$$\Delta G_{298.15K} = -237129,28455 J.mol^{-1}$$

Si la température change, la variation de l'énergie libre de Gibbs peut être donnée par :

$$\Delta G_T = \Delta H_T - T. \Delta S_T \quad (II.49)$$

Où :

$\Delta G_T$  : Variation de l'énergie libre de Gibbs à la température T et à la pression standard.

$\Delta H_T$  : Variation de l'enthalpie de formation à la température T et à la pression standard.

$\Delta S_T$  : Variation de l'entropie à la température T et à la pression standard.

Pour simplifier les équations, on suppose que  $\Delta H_T$  et  $\Delta S_T$  sont insensibles à la variation de température. Cette hypothèse est justifiée par le fait que les enthalpies et les entropies des

réactants et des produits augmentent simultanément lorsqu'augmente la température de façon à ce que leur différence reste sensiblement inchangée. Par conséquent, on peut raisonnablement employer  $\Delta H_{298.15K}$  et  $\Delta S_{298.15K}$  comme approximation de  $\Delta H_T$  et  $\Delta S_T$  respectivement.

De ce fait, on peut considérer que :

$$\Delta G_T = \Delta H_{298.15K} - T \cdot \Delta S_{298.15K} \quad (\text{II.50})$$

Comme  $\Delta G_{298.15K} = \Delta H_{298.15K} - 298.15 \cdot \Delta S_{298.15K}$  l'effet de la température peut être montré comme suit :

$$\begin{aligned} \Delta G(\text{température}) &= \Delta G_{298.15K} - \Delta G_T \\ &= (\Delta H_{298.15K} - 298.15 \cdot \Delta S_{298.15K}) - (\Delta H_{298.15K} - T \cdot \Delta S_{298.15K}) \\ &= (T - 298.15) \Delta S_{298.15K} \end{aligned} \quad (\text{II.51})$$

Puisque  $V = -\Delta G/2F$ , la variation de la tension de la cellule fonctionnant à une température  $T$  par rapport à la tension à la température standard est :

$$V_{différence}^T = -\frac{\Delta S_{298.15K}}{2F} (T - 298.15) \quad (\text{II.52})$$

Avec :  $V_{rev} = V_{Nernst} + V_{différence}^T$

On déduit que :

$$V_{rev} = \frac{-\Delta G^0}{2F} + \frac{RT}{2F} \ln \left[ \frac{P_H^2(P_{O_2})^{0.5}}{P_{H_2O}} \left( \frac{1}{P_{O_2}} \right)^{0.5} \right] - \frac{\Delta S_{298.15K}}{2F} (T - 298.15) \quad (\text{II.53})$$

Après calcul des potentiels standard, on trouve :

$$V_{rev} = 1.229 + (4.308 \cdot 10^{-5})T \cdot \ln(P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{0.5}) - (8.453 \cdot 10^{-4})(T - 298.15) \quad (\text{II.54})$$

Cette équation exprimant la tension réversible d'une cellule est largement rencontrée dans la littérature [34, 35, 36,37] .Elle rend compte de l'influence de la pression et de la température sur cette tension réversible.

### II.5.3.Caractéristiques de polarisation d'une pile à combustible PEMFC :

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

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

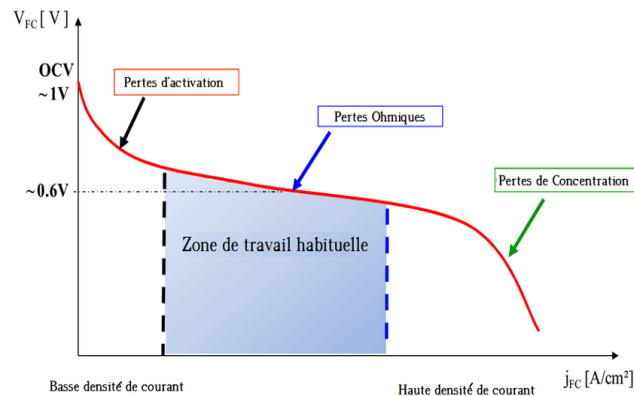


Figure II.10 : Courbe de polarisation de la pile à combustible

Et chaque polarisation est une chute de tension dominante dans une région particulière de densité de courant (faible, moyenne, ou élevée) [33].

### II.5.3.1. La polarisation ohmique :

Les pertes ohmiques dépendent du courant, de la température et de la teneur en eau de la membrane. La teneur en eau de la membrane dépend de l'humidité et des pressions des gaz réagissants. L'humidité relative de l'hydrogène est particulièrement influente sur l'humidité de la membrane.

Dans notre modèle, la teneur en eau de la membrane est supposée constante et maintenue à un niveau où la membrane est bien humidifiée sans être pour autant noyée. Cette condition est indispensable pour le bon fonctionnement de la PEMFC.

La résistance ohmique augmente avec le courant. En effet, la traînée électroosmotique est proportionnelle au courant. Ce phénomène dessèche la membrane et altère les performances de la pile.

Les pertes ohmiques se situent dans tous les conducteurs et les contacts interracialisés de la pile, aussi bien dans la pile que dans la membrane [38].

La tension ohmique est donnée par la loi d'Ohm :

$$\begin{aligned} V_{ohm} &= V_{ohm\text{-}\acute{e}lectronique} + V_{ohm\text{-}protonique} \\ &= i \cdot (R_{\acute{e}lectrtonique} + R_{protonique}) \\ &= i \cdot R_{interne} \end{aligned} \tag{II.55}$$

Où :

**i** : Courant de la cellule (en Ampère)

**$R_{\acute{e}lectrtonique}$**  : Résistance électronique de la cellule ( $\Omega$ ).

**$R_{protonique}$**  : Résistance protonique de la membrane ( $\Omega$ ).

La résistance électronique concerne les électrodes, les plaques bipolaires et les connexions. Dans le modèle d'Amphlett, comme dans la plupart des modèles rencontrés, cette résistance est supposée constante pour des températures de fonctionnement allant de 50°C à 90°C. En réalité, elle est difficile à déterminer.

La résistance protonique (résistance de la membrane au passage des protons H<sup>+</sup>), cause de l'essentiel des pertes ohmiques, est une fonction complexe de la teneur et la distribution de l'eau dans la membrane, de la température de fonctionnement T et du courant i.

En se basant sur les travaux de Springer et all. et ceux de Eikerling et all., Amphlett et all. ont émis une expression de la résistance protonique prenant en compte tous les paramètres importants de la membrane [37,39, 40].

$$R_{protonique} = \frac{Rm \cdot L}{A} \tag{II.56}$$

Où :

**A** : Surface active de la membrane

**$Rm$**  : Résistivité spécifique au passage des protons hydratés.

**L** : Epaisseur de la membrane



Les paramètres A et L dépendent des dimensions de la cellule, tandis que Rm est fonction du type et des caractéristiques du matériau de la membrane, de la température, de la teneur en eau de la membrane, et de la densité de courant. Il est désormais difficile de trouver une expression empirique qui rend compte de tous ces paramètres indépendants.

Nous ne considérons ici que la membrane en Nafion, la plus utilisée dans les PEMFC.

Amphlett et all. proposent l'expression empirique suivante pour la résistivité de la membrane en Nafion [39,40] :

$$Rm = \frac{181.6(1+0.03\frac{i}{A})+0.062(\frac{T}{303})^2(\frac{i}{A})^{2.5}}{(\lambda-0.634-3\frac{i}{A})\exp(4.18\frac{T-303}{T})} \quad (\text{II.57})$$

Où :

181.6/ ( $\lambda - 0.634$ ) représente la résistivité spécifique (ohm.cm) au courant nul à 30°C, le terme exponentiel le facteur de correction dans le cas où la pile fonctionne à une température différente de 30°C. Le paramètre  $\lambda$  peut avoir une valeur de 14 dans le cas idéal de 100% d'humidité et 23 dans le cas où la membrane est complètement saturée d'eau.  $\lambda$  dépend de plusieurs paramètres : procédure de la préparation de la membrane, humidité relative et stoechiométrie du gaz introduit à l'anode et éventuellement de l'âge de la membrane [36,37, 39].

### II.5.3.2. La polarisation d'activation :

Les pertes d'activation sont liées à la cinétique des réactions électrochimiques se déroulant aux électrodes. Une quantité d'énergie est consommée pour rompre les liaisons de l'oxygène et de l'hydrogène à ces électrodes [41]. Les pertes d'activation se déroulent dans les zones actives.

Constatant que ces pertes sont proportionnelles au logarithme du courant, Tafel propose l'expression suivante pour une cellule :

$$V_{act} = At \cdot \ln\left(\frac{j}{j_0}\right) = A \cdot \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \quad (\text{II.58})$$

Où :

At : Constante de Tafel

$i$ : Courant de la cellule (Ampère)

$i_0$ : Courant d'échange de la cellule

$j$  : Densité de courant de cellule (mA.cm<sup>-2</sup>)

$j_0$ : Densité de courant d'échange de la cellule.

Cette loi n'est valable que pour les courants tel que  $i \gg i_0$ .

Dans ce qui suit, on étudie « séparément » les pertes d'activation à chaque électrode. La polarisation d'activation de la cellule sera par la suite calculée en combinant les polarisations anodique et cathodique.

### II.5.3.2.1. La polarisation d'activation cathodique :

Comme l'oxydation de l'oxygène est beaucoup plus lente que la réduction de l'hydrogène, la polarisation cathodique est plus importante que celle anodique. Cette polarisation est donnée par la relation suivante :

$$V_{act,c} = \left(\frac{RT}{2\alpha_c}\right) \cdot \ln\left(\frac{i}{i_{0,c}}\right) \quad (\text{II.59})$$

Où :

$i$  : Courant de la pile

$i_{0,c}$ : Courant d'échange de la cathode

$\alpha_c$ : Coefficient de transfert de charge de la cathode.

$R$  : Constante des gaz

$T$  : Température de fonctionnement de la pile

Le terme  $(RT/2\alpha_c)$  représente la constante de Tafel pour la cathode.

### Le courant d'échange cathodique :

Berger propose des relations analytiques du courant d'échange cathodique et anodique. Ces relations sont reprises par Amphlett et al. Pour exprimer les pertes d'activation anodique et cathodique en fonction des concentrations des gaz, de la température de fonctionnement, du courant et de quelques paramètres empiriques.

Berger démontre que le courant d'échange cathodique peut être donné par l'expression :

$$I_{0,c} = n_c F \cdot A \cdot K_c^0 \cdot (C_{proton})^{1-\alpha_c} (C_{H_2O})^{\alpha_c} (C_{O_2})^{1-\alpha_c} \exp\left(\frac{-\Delta F_e}{RT}\right) \quad (II.60)$$

Où

T : Température de la pile

$C_{O_2}$  : Concentration de l'oxygène

F : Constante de Faraday

R : Constante universelle de gaz

A : Surface active de la cellule.

$\alpha_c$  : Coefficient de transfert de charge de l'anode

$n_c$  : Nombre d'électrons transférés par mole du composant électrolysé de la réaction de la cathode

$K_c^0$  : Constante de vitesse intrinsèque

$C_{H_2O}$  : Concentration de l'eau

$C_{proton}$  : Concentration de protons dans la membrane

$\Delta F_e$  : Energie libre d'activation standard de la réaction de la cathode

En remplaçant  $i_{0,c}$  par son expression dans l'équation (II.60), on trouve :

$$V_{act,c} = \frac{R}{2\alpha_c F} T \ln(i) + \frac{\Delta F_e}{2\alpha_c F} - \left[ \frac{R \ln(n_c F \cdot A \cdot K_c^0)}{2\alpha_c F} C_{proton}^{1-\alpha_c} \right] T - \frac{R(1-\alpha_c)}{2\alpha_c F} T \ln(C_{O_2}) \quad (II.61)$$

Cette équation peut être mise sous la forme

$$V_{act,c} = \beta_1 \cdot T \cdot \ln(i) + \beta_2 + \beta_3 \cdot T + \beta_4 \cdot T \cdot \ln(C_{O_2}) \quad (II.62)$$

### II.5.3.2.2. La polarisation d'activation anodique :

La tension d'activation anodique est donnée par :

$$V_{act,a} = \frac{RT}{2\alpha_a} \ln \frac{i}{i_{0,a}} \quad (II.63)$$

où  $\alpha_a$  est le coefficient de transfert de charge de l'anode. Le terme  $(RT/2\alpha_a)$  représente la constante de Tafel de l'anode.  $i_{0,a}$  est le courant d'échange de l'anode.

**Le Courant d'échange anodique :**

Berger montre que le courant d'échange anodique est donnée par

$$I_{0,a} = n_a \cdot F \cdot A \cdot K_a^0(c_{H_2}) \cdot \exp(-\Delta F_{ec}/RT) \tag{II.64}$$

Où

T : Température de la cellule.

$\alpha_a$  : Coefficient de transfert de charge de la cathode

$n_a$  : Nombre d'électrons transférés par mole du composant électrolysé de la réaction de l'anode.

$K_a^0$  : Constante de vitesse intrinsèque

$\Delta F_{ec}$  : Energie libre standard d'activation de l'adsorption chimique de la réaction de la cathode (en Joule/mole).

$I_{0,a}$  peut être remplacée par son expression dans l'équation (II.63) pour donner l'expression de la polarisation d'activation de l'anode :

$$V_{act,a} = \frac{RT}{2\alpha_a F} \ln(i) + \frac{\Delta F_{ec}}{2\alpha_a F} - \left[ \frac{R \ln(n_a F \cdot A \cdot K_a^0)}{2\alpha_a F} \right] T \cdot \ln(c_{H_2}) \tag{II.65}$$

La polarisation d'activation cathodique peut être finalement mise sous la forme :

$$V_{act,a} = \beta_5 T \cdot \ln(i) + \beta_6 + \beta_7 \cdot T \tag{II.66}$$

**II .5.3.2.3.La polarisation d'activation :**

L'expression de l'activation cathodique et celle de l'activation anodique peuvent être sommées pour exprimer la polarisation d'activation d'une cellule comme suit :

$$V_{act} = -[\xi_1 + \xi_2 \cdot T + \xi_3 \cdot T \cdot \ln(CO_2) + \xi_4 \cdot T \cdot \ln(i)] \tag{II.67}$$

Tel que :

$$\xi_1 = -(\Delta F_e/2\alpha_c F) - (\Delta F_{ec}/2\alpha_a F)$$

$$\xi_2 = R \ln(n_c F K_c^0/2\alpha_c F)(C_{proton})^{1-\alpha_c} \cdot (C_{H2O})^{\alpha_c} + [(R \ln(n_c F K_a^0/2\alpha_a F)]. \ln(C_{H2})$$

$$\xi_3 = R(1 - \alpha_c)/2\alpha_c F$$

$$\xi_4 = -(R/2\alpha_c F) - (R/2\alpha_a F)$$

La concentration en oxygène est donnée par l'expression suivante [37,40]:

$$C_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{5.08 \cdot 10^6 \cdot e^{(-498/T)}}$$

### II.5.3.3.Polarisation de concentration :

La polarisation de concentration est le résultat de la réduction de la concentration des réactants dans les canaux à gaz. Les réactants étant utilisés aux surfaces des électrodes. Cette polarisation est plus significative aux courants élevés où les réactants sont utilisés au débit maximal.

Notre modèle définit la tension de concentration comme suit [34, 37,42] :

$$V_{con} = -B \ln\left(1 - \frac{j}{j_{max}}\right) \quad (II.68)$$

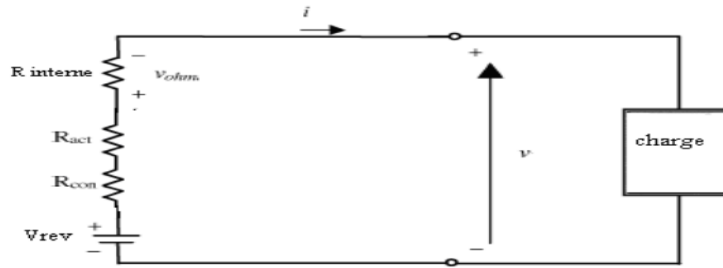
Où B (en volt) est une constante dépendant de la pile.

La tension de la cellule est finalement donnée par :

$$V = V_{rev} - V_{ohm} - V_{act} - V_{conc} \quad (II.69)$$

### II.5.4.Schémas électrique équivalent d'une cellule de PAC en statique :

Les équations (II.55, II.67, II.68, II.69) représentent le modèle statique d'une cellule de la PEMFC. Dans ce cas la cellule peut être modélisée par le circuit électrique de la Figure1 constitué de résistances non linéaires représentant les résistances ohmiques, d'activation et de concentration. La tension de Nernst est modélisée par une source de tension Continue :



**Figure II.11** : Circuit électrique équivalent d'une cellule en statique.

On peut écrire :

$$R_{ohm} = V_{ohm}/i \quad (\text{II.70})$$

$$R_{act} = V_{act}/i \quad (\text{II.71})$$

$$R_{con} = V_{conc}/i \quad (\text{II.72})$$

Où :

$V_{ohm}$  : Tension ohmique de la cellule.

$V_{act}$  : Tension d'activation de la cellule.

$V_{conc}$  : Tension de concentration de la cellule.

$i$  : Courant de la cellule

### II.5.5. Schéma électrique équivalent d'une cellule en dynamique :

Dans la PEMFC, existe un phénomène complexe nommé « couche de double charge ». Ce phénomène est d'une grande importance pour la compréhension du comportement dynamique de la pile à combustible.

La couche de double charge se comporte comme un condensateur. De ce fait, si le courant de la pile change, il faut un certain temps pour que la tension de la cellule atteigne sa valeur stationnaire (en régime permanent). Ce retard affecte la tension de concentration et la tension d'activation. La tension ohmique, n'étant pas concernée par ce retard, change immédiatement lorsque change le courant de la pile.

Ce phénomène étant modélisé par un condensateur de capacité C, la pile peut être finalement représentée par le circuit électrique équivalent suivant :

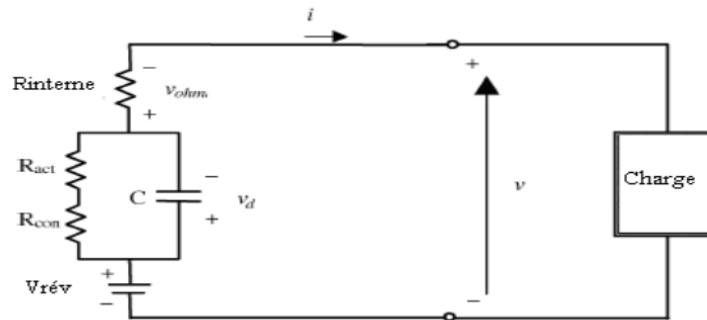


Figure II.12 : Schéma électrique équivalent d'une cellule en dynamique.

La constante de temps liée au phénomène de la couche de double charge est donnée

Par :

$$\tau = C.(R_{act} + R_{conc}) \quad (II.73)$$

Où C'est la capacité équivalente (en Farad).  $R_{act}$  Et  $R_{conc}$  ne sont calculées que lorsque  $V_{act}$  et  $V_{conc}$  atteignent leurs valeurs en régime permanent.

La tension de la cellule, en prenant compte de son comportement électrique dynamique, est donc donnée par :

$$V = E_{Nernst} - V_{ohm} - V_d \quad (II.74)$$

Où

$V_d$  est donnée par l'équation différentielle :

$$\frac{dV_d}{dt} = \left(\frac{1}{C}\right) i - \left(\frac{1}{\tau}\right) V_d \quad (II.75)$$

## II.6. Les convertisseurs :

### II.6.1. Hacheurs (Convertisseur DC-DC) :

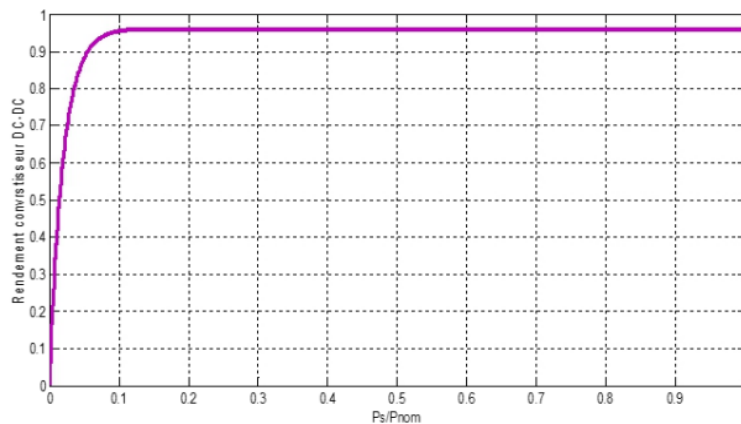
Les convertisseurs DC-DC utilisés pour les applications PV et PAC peuvent être non isolants ou isolants. Le convertisseur non isolant est utilisé lorsque la tension doit être

augmentée ou diminuée et aucune isolation diélectrique n'est requise. Les convertisseurs d'isolement sont utilisés lorsque l'isolement et un taux de conversion élevé sont requis [31].

Le générateur photovoltaïque et la pile à combustible sont connectés au bus DC via un convertisseur BOOST pour élever leur tension de sortie. La relation entre l'entrée et la sortie du convertisseur DC-DC est définie comme les équations suivantes [32] :

$$PPV - DC = \eta_{DC - DC} \cdot PPV \quad (II.76)$$

$$PPAC - DC = \eta_{DC - DC} \cdot PPAC \quad (II.77)$$



**Figure II.13 :** évolution du rendement du convertisseur DC-DC en fonction de sa puissance de sortie normalisée.

### II.6.2-L'onduleur (convertisseur DC-AC) :

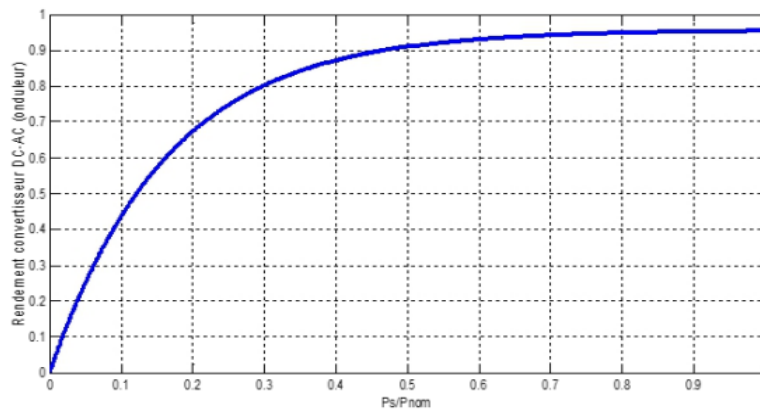
La charge étant alimentée en courant alternatif, un onduleur est donc présent entre le bus continu et la charge (voir Figure II.13). Il existe diverses équations pour définir le rendement d'un onduleur en fonction de la puissance délivrée (A. El-Maaty, 2005 ; M. H. Macagnan & E. Lorenzo, 1992).

Pour notre onduleur, les valeurs des rendements à 10% et 100 % de  $P_{nom}$  sont :

$\eta_{10} = 0.85$  et  $\eta_{100} = 0.96 \Rightarrow \eta_0 = 17.40 \times 10^{-3}$  et  $m = 24.26 \times 10^{-3}$  Ce modèle présente l'avantage d'être simple et de représenter fidèlement les pertes énergétiques d'un



convertisseur. Il a été validé dans la thèse d'Abou El-Maaty (2005).



**Figure II.14:** évolution du rendement de l'onduleur en fonction de sa puissance de sortie normalisée.

## II.7.Conclusion :

Ce chapitre se concentre sur la modélisation des composants du système d'énergie hybride examiné, notamment le photovoltaïque et la pile à combustible, ainsi que les systèmes de stockage tels que la batterie et l'électrolyseur, en plus des convertisseurs employés. Pour garantir une gestion optimale de ces diverses sources en vue d'alimenter des charges variables, nous suggérons la mise en place d'un système de gestion chargé de surveiller et de réguler les flux de puissance.

# **Chapitre III : Simulation de gestion de l'énergie électrique**

### III.1.Introduction :

Après avoir modélisation les divers composants d'un système hybride dans le chapitre précédent, nous nous concentrons dans ce chapitre sur la simulation individuelle de chaque élément du système global (comme le GPV et la pile à combustible). Nous allons utiliser Matlab Simulink pour simuler le système étudié, afin d'obtenir des courbes représentatives et de présenter les résultats obtenus.

### III.2.Modèle Simulink de générateur PV :

Schéma de simulation d'un module photovoltaïque réalisé avec Simulink. Ce schéma modélise le comportement d'un module photovoltaïque soumis à une irradiation de 1000 W/m<sup>2</sup>. La mesure du courant (avec un ampèremètre) et de la tension (avec un voltmètre) est effectuée en présence d'une charge variable, ce qui permet d'étudier les caractéristiques électriques du module. Les données de courant et de tension sont envoyées à l'espace de travail MATLAB pour analyse. Un multiplicateur calcule la puissance produite par le module, et les courbes courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) sont affichées sur des scopes, permettant d'évaluer la performance du module photovoltaïque, notamment le point de puissance maximale. Ce schéma est essentiel pour optimiser les systèmes photovoltaïques et comprendre leur comportement sous différentes conditions de charge.

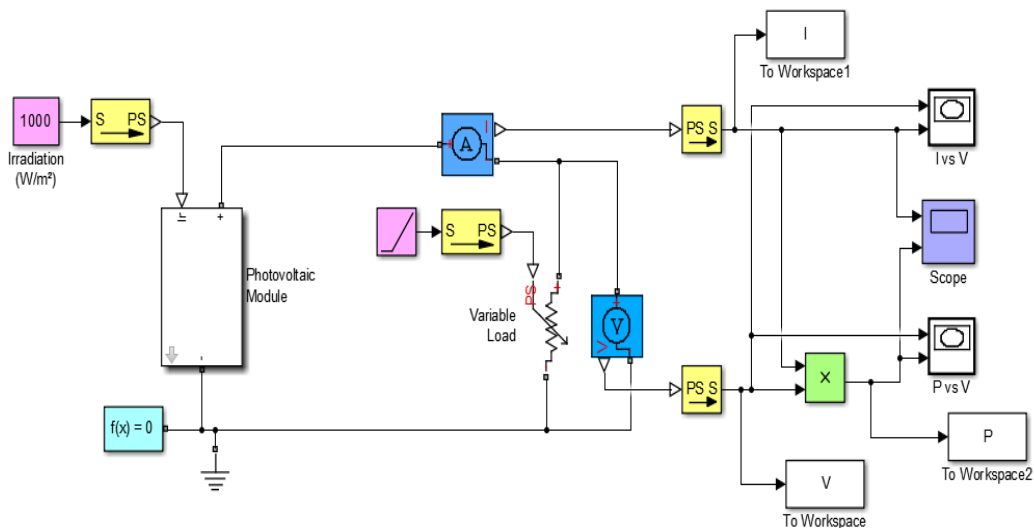


Figure III.1 : Schéma bloc de la générateur PV en MATLAB-SIMULINK.

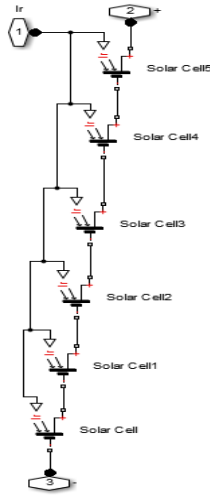


Figure.III.2 : Connexion en série de 06 cellules.

La connexion en série de 6 sous-systèmes créés nous donne le panneau solaire 6x6 de (Figure.3).

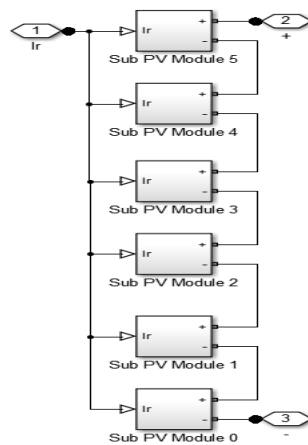


Figure. III.3 : schéma bloc des cellules PV assemblées en série en MATLAB-Simulink

La simulation des cellules photovoltaïques (PV) assemblées en série permet d'analyser la performance et d'optimiser la conception des panneaux solaires.

En connectant les cellules en série, on augmente la tension de sortie totale, ce qui est essentiel pour de nombreuses applications énergétiques. Cette simulation aide à évaluer l'impact des variations de l'irradiance solaire et de la température sur le comportement du panneau, permettant ainsi de maximiser l'efficacité énergétique et de prévoir les performances réelles du système dans diverses conditions.

### III.2.1. Les caractéristiques I(V) et P(V) :

L'importance de la courbe I(V) et P(V) est qu'elle décrit la capacité de conversion d'énergie de la cellule solaire, c'est-à-dire la conversion de l'énergie de rayonnement qui lui tombe dessus en énergie électrique, sous une quantité spécifique de rayonnement solaire incident à une certaine température.

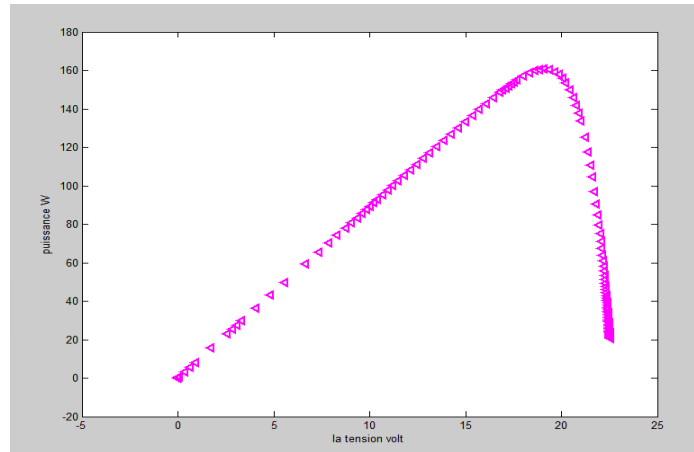


Figure. III. 4 : Caractéristique P(V) d'une cellule ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ,  $G=1000\text{W}/\text{m}^2$ )

Ce graphique montre comment la puissance de sortie varie avec la tension.

La puissance augmente avec la tension au début, atteignant un pic autour de 20V.

Après avoir atteint le point de puissance maximale, la puissance commence à diminuer à mesure que la tension continue d'augmenter.

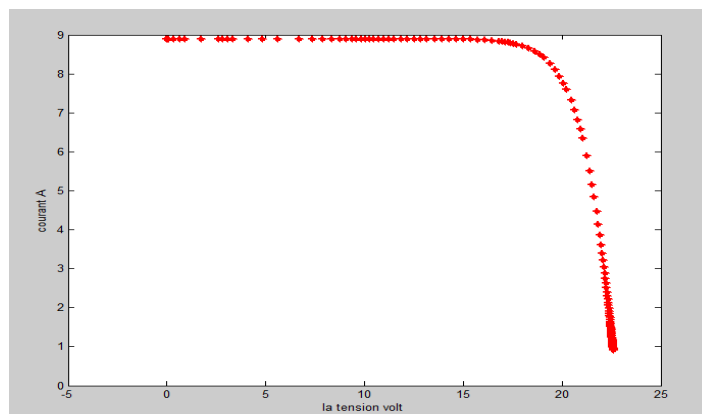


Figure. III.5 : Caractéristique I(V) d'une cellule ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ,  $G=1000\text{W}/\text{m}^2$ )

Ce graphique montre comment le courant varie avec la tension.

Le courant reste presque constant (environ 9A) à mesure que la tension augmente de 0 à environ 20V, Après 20V, le courant chute brusquement à mesure que la tension continue d'augmenter.

Les caractéristiques électriques de cellule sont données dans le tableau suivant :

Eclairement standard	$G=1000 \text{ W/m}^2$
Température standard	$T=25^\circ\text{C}$
Courant de court-circuit $I_{cc}$	8,9 A
Facteur d'idéalité A	$A=1,2$
Tension a circuit ouvert $V_{oc}$	22.75

Tableau III.1 : Caractéristique électrique de la cellule dans les conditions standards  $T=25^\circ\text{C}$ ,  $G=1000\text{W /m}^2$

### III.2.2.Le Maximum Power Point Tracking (MPPT):

Le Maximum Power Point Tracking (MPPT) est un aspect crucial dans la simulation du générateur photovoltaïque (GPV). Il s'agit d'une technique utilisée pour maximiser l'efficacité de conversion de l'énergie solaire en électricité en ajustant en temps réel la tension ou le courant de sortie du GPV afin de maintenir son point de fonctionnement optimal, appelé le point de puissance maximale (MPP).

Dans notre simulation, nous intégrons un algorithme de MPPT dans le modèle du GPV pour suivre les variations des conditions environnementales et maximiser le rendement énergétique. L'algorithme MPPT ajuste continuellement les paramètres du système, tels que la tension ou le courant de sortie du GPV, pour maintenir le GPV au MPP, même en présence de fluctuations de l'intensité lumineuse ou des conditions météorologiques.

En simulant le MPPT, nous évaluons l'efficacité du système dans le suivi et le maintien du MPP, ce qui nous permet d'optimiser les performances globales du générateur photovoltaïque et, par extension, du système hybride dans son ensemble.

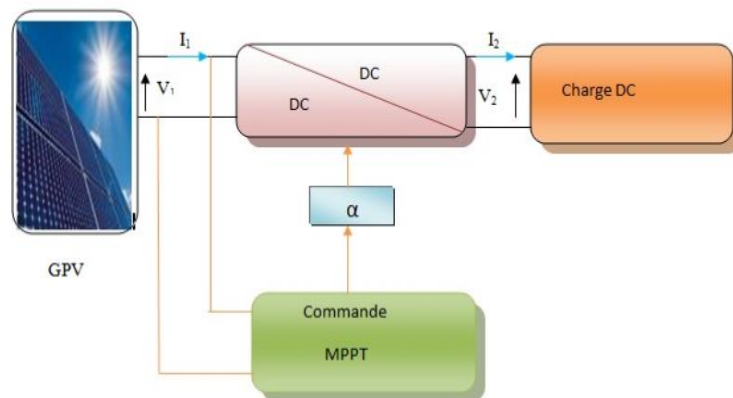


Figure.III.6 : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.

### III.2.3.Résultats de la simulation :

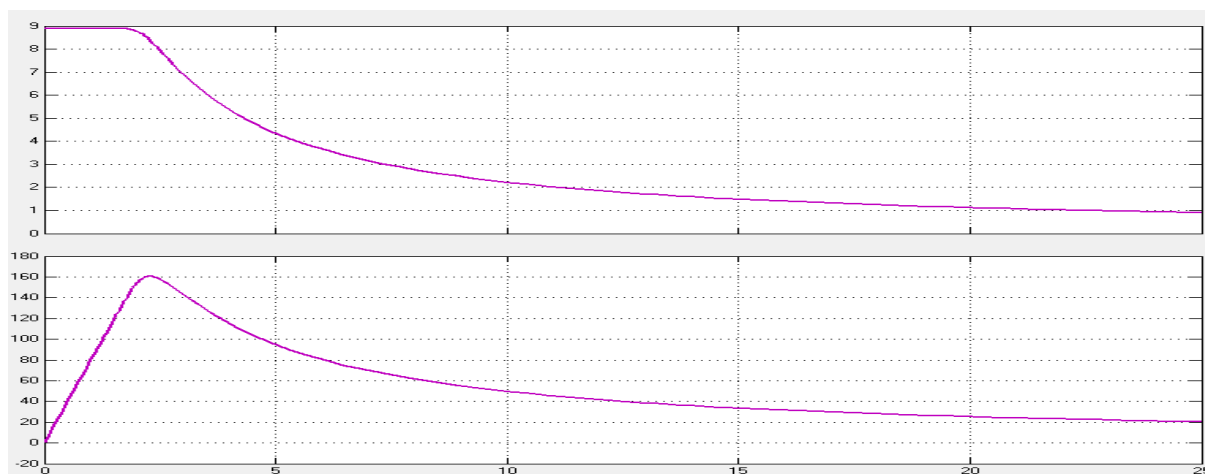


Figure.III.7 : Montre le système de point de puissance maximale (MPPT) pour un panneau photovoltaïque.

#### Graphique supérieur

Le graphique supérieur montre probablement la tension (V) en fonction du temps : La courbe commence à une valeur élevée et diminue progressivement, Cela pourrait représenter la tension de sortie d'un panneau photovoltaïque sous différentes conditions de charge ou d'ensoleillement.

#### Graphique inférieur

Le graphique inférieur montre probablement la puissance (P) en fonction du temps : La courbe montre une augmentation rapide suivie d'une diminution progressive.

Le pic représente le point de puissance maximale (MPP) où le système atteint la puissance maximale que le panneau peut produire sous les conditions données.

#### Interprétation :

Les deux graphiques ensemble montrent comment le système MPPT ajuste la tension pour maximiser la puissance extraite du panneau photovoltaïque :

Au début, la tension est relativement élevée, mais cela ne correspond pas au MPP.

Le MPPT ajuste la tension pour trouver le MPP, ce qui se manifeste par un pic dans le graphique de la puissance.

Après avoir trouvé le MPP, la tension se stabilise autour de la valeur optimale pour maximiser la puissance.

### III.3.Modèle Simulink de pile à combustible PEM

Cet exemple montre le modèle d'empilement de pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEM) alimentant un convertisseur DC/DC de valeur moyenne de 100 Vdc. La figure (III.8) montre le modèle complet de pile à combustible qui produit 6 kW et 45V DC. Le convertisseur élévateur DC/DC (Boost) régule la tension jusqu'à 100 v et il est chargé avec une charge RL pour visualiser le scénario en temps réel. La simulation a été effectuée pour obtenir les résultats des variations de l'efficacité de la pile à combustible lorsque les paramètres d'entrée de la pile à combustible sont chargés. Initialement pendant 10 secondes, l'entrée de carburant était constante, mais après 10 secondes, le commutateur a changé la position et les paramètres d'entrée ont commencé à changer, tels que les changements de débit de carburant de 50 Imp. (litre par minute) à 85 Imp.

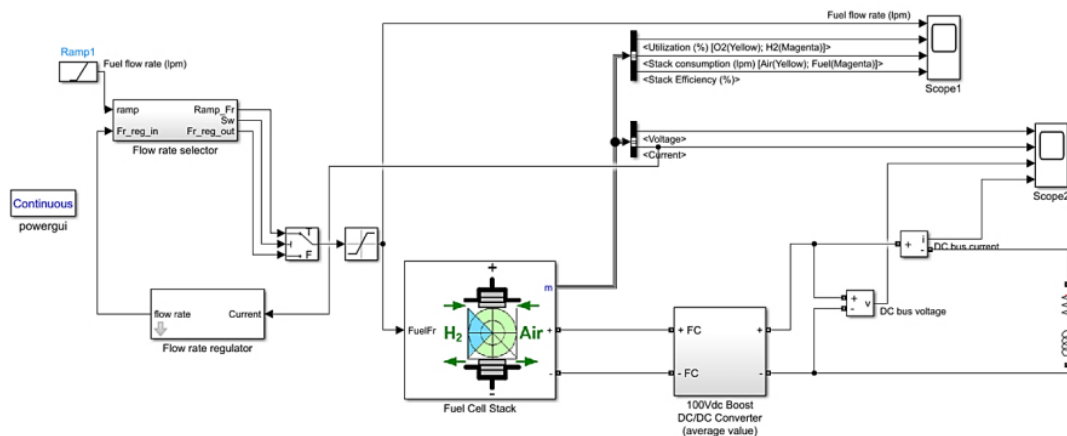


Figure III.8 : Modèle Simulink de pile à combustible PEM

Le sélecteur de débit



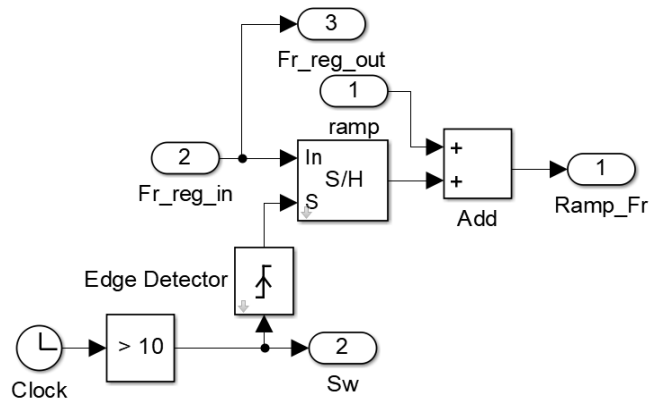


Figure III.9 : schéma bloc 1 sélecteur de débit dans MATLAB SIMULINK

Le régulateur de débit

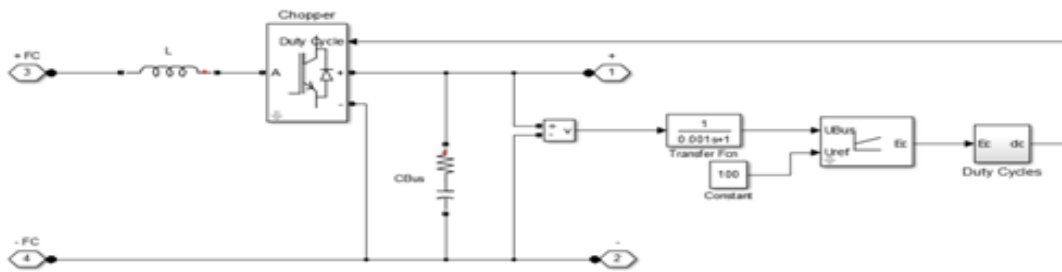


Figure III.10 : schéma bloc 2 régulateur de débit dans MATLAB SIMILUNK

Le cycle de service :

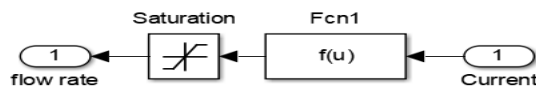


Figure III.11 : schéma bloc 3 du cycle de service.

### III.3.1. Résultats de la simulation du système à pile à combustible :

Les résultats de la simulation ont été obtenus à l'aide du logiciel Matlab/Simulink en utilisant les paramètres physiques indiqués dans le Tableau III.2.

Paramètres du modèle pile à combustible PEM	
puissance de la pile	-Nominal = 5998.5 W - Maximale = 8325 W
Résistance de PEM	0.07833 ohms
tension d'une cellule	1.1288 V

Nominale utilisation hydrogène H2	99.56%
Nominale utilisation d'oxygène O2	59.3%
Nominale consommation du combustible H2	60.38 slpm
Nominale consommation de l'aire	143.7 slpm
Le courant	0.29197 A
Coefficient $\alpha$	0.60645
Composition d'H2	99.95%
Composition d'O2	21%
Débit de carburant à utilisation nominale d'hydrogène	-Nominale = 50.06 Ipm -Maximale = 84.5 Ipm
Débit d'air à utilisation nominale d'oxydant	-Nominale = 300 Ipm -Maximale = 506.4 Ipm
Température [T]	338 Kelvin
Pression d'alimentation en carburant	1.5 bar
Pression d'alimentation en air	1 bar

Tableau III.2 : Paramètres physiques de PEM

**III.3.1.1.Caractéristique courant-tension et courbe de puissance :**

Les différentes mesures de la tension de la pile à combustible pour une variation de courant permis de calculer la puissance de cette dernière, les résultats obtenus sont représentés en Figure (III.12).

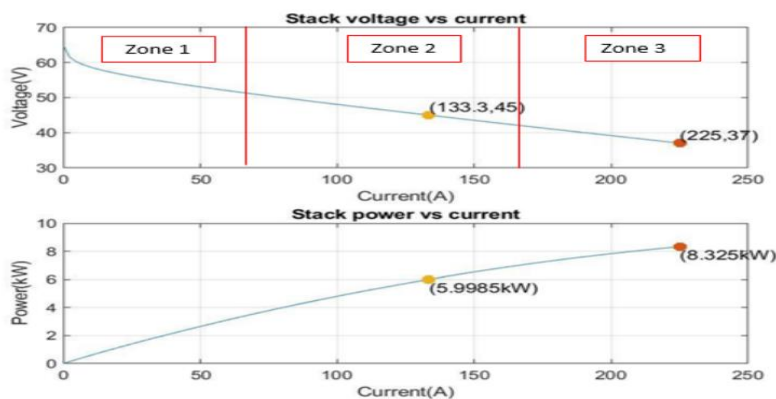


Figure III.12 courbe de polarisation de la pile à combustible

La figure (III.12) illustre la courbe de polarisation d'une pile à combustible, montrant la variation de sa résistance en fonction des flux de charge. Les caractéristiques intrinsèques de la pile à combustible entraînent une chute de tension accrue en raison des pertes chimiques internes croissantes.

Dans la première région, dite région d'activation, la chute de tension est due à la lenteur de la réaction chimique à la surface des électrodes. La largeur de cette région dépend de la température et de la pression de fonctionnement du système, ainsi que du choix des types d'électrodes et de catalyseur.

La deuxième région, appelée région ohmique, reflète les pertes résistives causées par les matériaux à résistance interne utilisés dans les empilements de piles à combustible, notamment l'anode, la cathode et l'électrolyte.

Enfin, la troisième région, nommée région de concentration, indique les pertes de transport de masse dues au changement de concentration des réactifs, à mesure que le carburant s'épuise dans la pile.

**La courbe tension-courant :** montre une relation exponentielle entre 0 A et 133,3 A. Au-delà de 133,3 A, cette relation devient linéaire. Pour un faible courant de charge, la tension diminue exponentiellement à mesure que le courant augmente, un comportement caractéristique de tous les processus électrochimiques.

**La courbe de puissance de la pile à combustible :** pour un courant maximal de 225 A, la pile produit environ 9 kW (puissance maximale). Si nous extrapolons les caractéristiques pour des courants plus élevés (au-delà de 225 A), nous remarquons que la puissance maximale de la pile à combustible peut être augmentée en augmentant le nombre de cellules, ce qui entraîne également une augmentation du courant.

La tension et le courant de sortie de la pile à combustible est montré sur la figure (III.13)

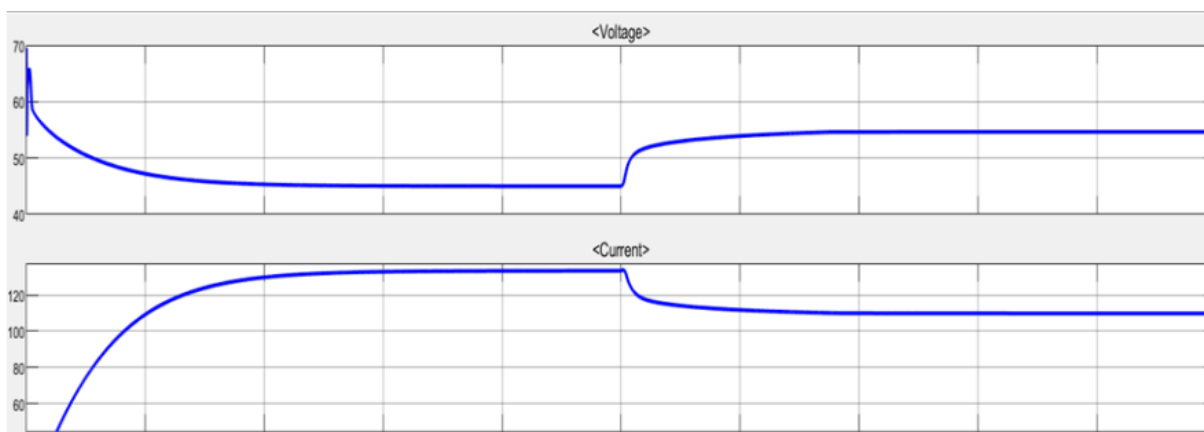


Figure III.13 : Tension et courant de pile à combustible

**Interprétation :**

La Figure (III.13) illustre la variation de la tension et du courant d'un empilement de piles à combustible PEMFC en fonction du temps. On observe que la pile à combustible PEMFC atteint son régime permanent avec une tension de 50 V et un courant de 140 A après un temps de 10 secondes.

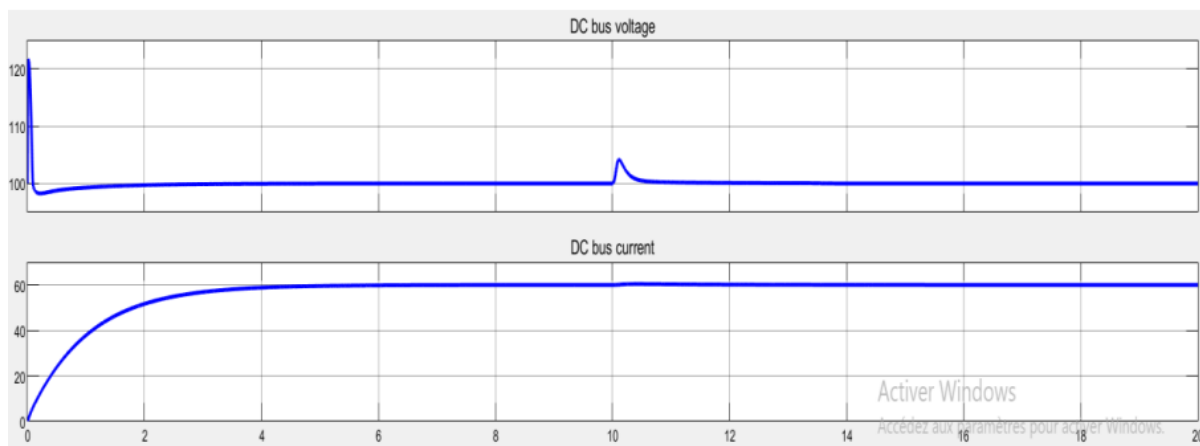


Figure III.14 Variation de tension et courant pour convertisseur élévateur DC/DC (Boost) en fonction de temps.

**Interprétation :**

La tension de sortie de la pile à combustible est faible, ce qui nécessite l'utilisation d'un convertisseur élévateur pour augmenter et réguler la tension continue, comme illustré à la figure (III.14). Au début de la simulation, un pic de tension atteignant 122 volts est observé en raison de la faible chute initiale. Cependant, l'inducteur, qui s'oppose aux variations de courant, et la fonction de transfert interfacent avec les impulsions de l'IGBT stabilisent la tension, la maintenant constante. Après 10 secondes, l'alimentation en carburant augmente, ce qui entraîne une hausse de la tension. Le régulateur intervient alors pour stabiliser la tension en 10 secondes, assurant une tension stable à la charge.

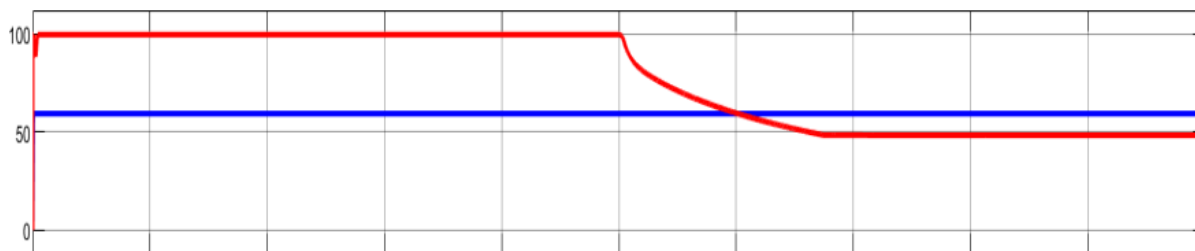


Figure III.15 : Utilisation de l'hydrogène et de l'oxygène

La courbe rouge hydrogène H<sub>2</sub>

La courbe bleue oxygène O<sub>2</sub>

### Interprétation :

La figure (III.15) montre la quantité d'oxygène et d'hydrogène fournie à la pile à combustible en fonction du temps. On observe que 99,56 % de l'hydrogène disponible dans le réservoir est fourni à la pile, avec une utilisation constante de 60 % d'oxygène.

La figure (III.16) montre la quantité d'hydrogène (H<sub>2</sub>) et d'oxygène (O<sub>2</sub>) consommée pour produire une sortie. On observe que lorsque le débit varie, des variations correspondantes se produisent dans la consommation de ces gaz.

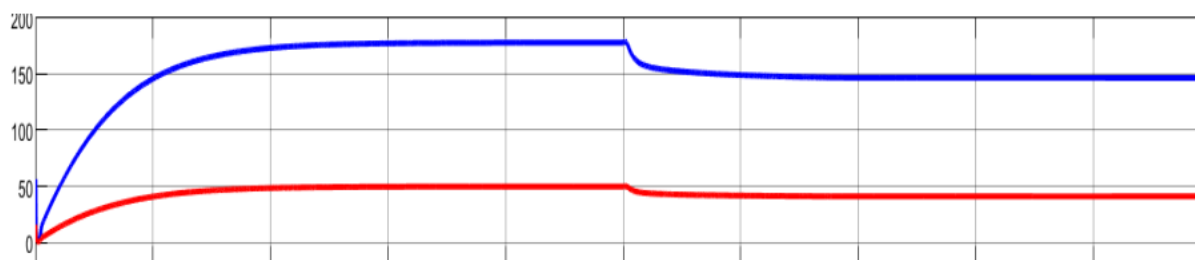


Figure III.16 : consommation de la pile de combustible pour l'air et le combustible

La courbe bleue l'air

La courbe rouge le combustible H<sub>2</sub>

La réaction lente dans la pile à combustible a entraîné une augmentation de la tension, ce qui a accéléré le débit et réduit la stabilité de la réaction. Par conséquent, la consommation d'hydrogène a augmenté, entraînant une diminution de l'efficacité du carburant, comme le montre la figure (III.17).

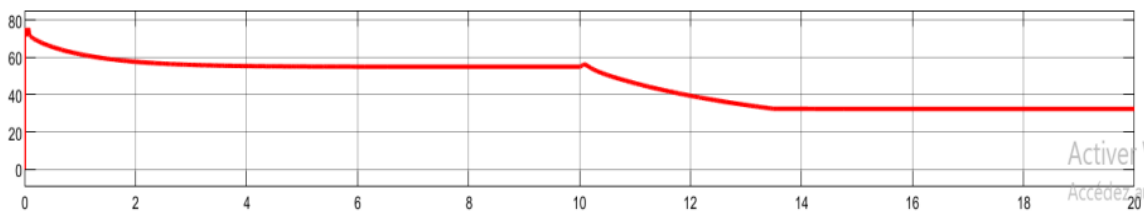


Figure III.17 : rendement de pile à combustible

Le rendement de la cellule PEM testée est de 55 %, mais lorsque le débit de carburant est lent, ce rendement diminue jusqu'à 32 %. De plus, la vitesse de réaction étant faible, la pile ne s'active pas complètement, comme le montre la figure (III.16). Lorsque le débit de carburant est augmenté, la pile à combustible n'est pas capable d'utiliser tout le carburant simultanément, ce qui entraîne une augmentation du carburant non utilisé et une diminution du rendement. Par conséquent, le rendement global est réduit. Ainsi, la pile à combustible doit fonctionner dans la plage de saturation de ses caractéristiques pour obtenir un rendement maximal.

#### III.4.Conclusion :

Ce chapitre a présenté les modèles Simulink pour chaque composant des chaînes de conversion photovoltaïque et de la pile à combustible. Les simulations ont démontré la faisabilité d'utiliser un système hybride avec une gestion centralisée, permettant à chaque composant d'être utilisé selon les besoins spécifiques. Le dimensionnement de ce système a été réalisé après une évaluation du potentiel énergétique disponible et des besoins énergétiques des utilisateurs. Une stratégie de gestion de l'énergie pour le système hybride étudié a été développée et les résultats de simulation globale ont confirmé l'efficacité de ce dispositif.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

---

l'étude et la modélisation du système hybride autonome basé sur une pile à combustible à hydrogène et des panneaux photovoltaïques représentent une avancée significative dans le domaine des énergies renouvelables et de la technologie énergétique durable. Ce type de système offre une solution innovante pour répondre aux besoins énergétiques dans des environnements isolés ou déconnectés des réseaux électriques traditionnels.

Les piles à combustible à hydrogène se distinguent comme des dispositifs électrochimiques efficaces, convertissant directement l'hydrogène en électricité avec pour seul sous-produit de l'eau. Leur intégration avec les panneaux photovoltaïques permet de maximiser l'utilisation des ressources renouvelables disponibles : les panneaux solaires produisent de l'électricité pendant les périodes ensoleillées, tandis que la pile à combustible assure un approvisionnement continu en cas de faible ensoleillement ou la nuit.

Cette combinaison technologique contribue non seulement à réduire la dépendance aux combustibles fossiles et à minimiser l'empreinte carbone, mais aussi à renforcer la résilience énergétique des communautés isolées. L'étude approfondie et la modélisation de ces systèmes visent à optimiser leur conception, leur efficacité et leur performance. Les modèles mathématiques et les simulations jouent un rôle crucial en permettant de prédire le comportement du système sous différentes conditions et d'identifier les meilleures stratégies de gestion énergétique.

Nous avons vu dans le premier chapitre les composants d'un système hybride, tels que les panneaux photovoltaïques, les piles à combustible, les électrolyseurs, l'hydrogène et les batteries, travaillent ensemble pour maximiser l'efficacité énergétique. Cette synergie permet de produire, stocker et utiliser l'énergie de manière optimale, réduisant ainsi l'impact environnemental et améliorant la performance globale du système.

Le deuxième chapitre sur la modélisation des éléments des systèmes hybrides met en lumière l'importance cruciale de la simulation pour optimiser l'intégration et les performances des composants tels que les moteurs, les batteries, et les systèmes de gestion de l'énergie. La capacité à prédire avec précision le comportement de ces éléments permet non seulement de maximiser l'efficacité énergétique, mais aussi de réduire les coûts opérationnels et les impacts environnementaux. Cette approche méthodique est essentielle pour le développement futur de systèmes hybrides plus performants et durables. En le dernier chapitre la simulation et



## **Conclusion générale**

---

l'interprétation des résultats d'un système hybride PV-pile à combustible sont cruciales pour évaluer sa performance et son efficacité. Ces analyses permettent d'optimiser le système, en maximisant les avantages énergétiques et en minimisant les coûts et les impacts environnementaux.

En résumé, l'étude et la modélisation de ce système hybride offrent des perspectives prometteuses pour l'avenir de la production d'énergie durable et autonome, en répondant aux exigences croissantes de durabilité environnementale et de sécurité énergétique. Ces efforts ouvrent la voie à de nouvelles innovations et applications dans le domaine des technologies énergétiques, visant à créer un impact positif à long terme sur notre environnement et notre société.

### Références Bibliographies

- [1] : **I. Vechiu**, « modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome », Thèse de doctorat, Université du Havre, le 15 /12/2005.
- [2] : **A. Ferhat, A. Amirouche**, «Etude et implémentation d'une stratégie de contrôle d'un système hybride (Photovoltaïque Diesel) », Université Abderrahmane Mira, Bejaia, 2012.
- [3] : **FRADJ Mohammed, MECHERI Khair Eddine**, «Etude et gestion d'un système hybride», Université Kasdi Merbah, Ouargla, 2019.
- [4] : **Hemza Bouaouaou**, " Modélisation, étude et commande d'un système hybride de conversion des énergies renouvelables ". Université Mohammed Seddik BENYAHIA – Jijel Faculté des Sciences et de la Technologie.2022.
- [5] : **Sara ABADA**, "Compréhension et modélisation de l'emballage thermique de batteries Li-ion neuves et vieilles". Thèse De Doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie.2016.
- [6] : <https://www.batteries-prod.fr/quels-sont-les-avantages-dune-batterie-lithium-ion>
- [7]:<https://www.jungheinrich-profishop.fr/fr/guide-pro/batterie-lithium/>.
- [8] : <https://www.planete-energies.com/fr/media/article/batterie-lithium-ion-comment-ca-marche>.
- [9] : Microsoft® Encarta® 2009, “Hydrogène”, Microsoft Corporation, 2008.
- [10] : [www.ifpenergiesnouvelles.fr](http://www.ifpenergiesnouvelles.fr),
- [11] : **D. Jury**, “d'énergie à base d'hydrogène dans un réseau électrique Remerciements,” 2019.
- [12]:**S. Kutsaev et al.**, “Electron accelerators for novel cargo inspection methods,” Phys. Procedia, vol. 90, pp. 115–125, 2017.
- [13]: **G. Aragón-González, A. León-Galicia, R. González-Huerta, J. M. R. Camacho, and M. Uribe-Salazar**, “Hydrogen production by a {PEM} electrolyser,” J. Phys. Conf
- [14] :<https://parlonssciences.ca/ressources-pedagogiques/les-stim-en-contexte/comment-fonctionne-une-batterie-lithium-ion>
- [15] : **I. Brahimi, I. Hamma**, «Production d'hydrogène à base d'un système de conversion photovoltaïque», Université A. MIRA-BEJAIA Faculté de Technologie, 2022

## Références Bibliographies

---

- [16] : **J. LACHAISE**, « Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à pile à combustible (PAC) destinées à la traction ». Thèse de doctorat de l'institut national POLYTECHNIQUE de Toulouse, 2004.
- [17] : **T. HAMIDATOU, S. KHENNOUR**, «Etude d'un système de pile à combustible alimenté par hydrogène solaire photovoltaïque», UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA Faculté des Sciences Appliquées, 2018.
- [18] : **T. HAMIDATOU, S. KHENNOUR**, « Etude et simulation du système hybride PV/ Pile à combustible/Batterie», UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA Faculté des Sciences Appliquées, 2020.
- [19] : **Ludmil Stoyanov**, « Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables», UNIVERSITE DE CORSE PASQUALE PAOLI Faculté des Sciences et Techniques, 2011.
- [20] : **Mounir SAHLI**, «Etude de la production de l'hydrogène par électrolyse et pile à combustible,thèse de magister», Université Mentouri de Constantine, 17/10/2010.
- [21] : **Pierre MAYÉ**, «Générateurs électrochimiques», édition DUNOD, PARIS, 2010.
- [22] : **Nurcan MAMACA**, «Synthèse et Caractérisation de Matériaux Électrocatalytiques pour l'Activation de la Molécule d'Eau : Application dans une Anode d'Électrolyseur de Type PEM», thèse de doctorat, université de Poitiers, 4 Novembre 2011.
- [23] : Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau- Mémento de l'hydrogène- Fiche 3.2.1-AFHYPAC
- [24] : **C.Zidani, F.Benyarou**, «Simulation de la position apparente du soleil et estimation des Energies Solaires incidentes sur un Capteur Plan pour la Ville de Tlemcen en Algérie»,Rev.Energ.Ren, Vol.6,pp69-76,2003.
- [25] : **Bouzid Allal El Moubarek, Azizi Mohammed**, «Dimensionnement d'un système photovoltaïque pour l'alimentation d'une ferme Étude de l'onduleur triphasé lié à cette application, mémoire pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état», université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 23-06-2008.
- [26] : <https://harveypoweress.com/fr/lithium-ion-battery-questions/>
- [27] : **Mohamed Ansoumane CAMARA** 2011 «Modélisation du stockage de l'énergie Photovoltaïque par super condensateurs » Thèse de doctorat, Université Paris-Est.
- [28] : <https://h2sys.fr/2017/09/27/pile-a-combustible-pile-a-hydrogene-explications/>
- [29] : Production d'hydrogène à partir des procédés de reformage et d'oxydation partielle, mémento de l'hydrogène fiche 3.1.1, source : AFHYPAC -IFPEN, 2011.

## Références Bibliographies

---

- [30]: **A.Borni**, « Etude et optimisation d'un multi système hybride de conversion d'énergieélectrique » Thèse Doctorat en sciences en électrotechnique, 2015.
- [31]: **Gitanjali Mehta, Vinod Kumar Yadav**,«Design of Photovoltaic and Fuel CellsbasedDistributedGenerationSystem : Entire System Survey ». 2018 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON) GalgotiasUniversity, GreaterNoida, UP, India. Sep 28-29, 2018
- [32]:**YasuhitoHidaka, Koji Kawahara**,«Modeling of a Hybrid System of Photovoltaic and Fuel cell for Operational Strategy in Residential Use ».47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC).2012
- [33]: **F. Amrouche, B. Mahmah, M. Belhamel et H. Benmoussa**,« Modélisation d'une pile à combustible PEMFC alimentée directement en hydrogène-oxygène et validation expérimentale ». Rev. Energ. Ren. Vol. 8 (2005) 109 – 121.
- [34]: **Andrew Richard Balkin**, «Modeling a 500W Polymer Electrolyte Fuel Cell», These de doctorat, University of Technology, Sydney.
- [35]: **Mikko Mikkola**, «Experimental Studies on polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Stacks », Thèse présentée pour obtenir le diplôme de Master of Science in Technology, Helsinki University of Technology, 2001.
- [36]: **Jeferson Marian Corrêa, Felix Alberto Farret**,«Influence of the Modeling Parameters on the simulation accuracy of Proton Exchange Membrane Fuel Cells». IEEE, 2003.
- [37]: **Jeferson Marian Corrêa, Felix Alberto Farret, Vladimir A.Popov, Marcelo G.Simoes**, «Sensitivity Analysis of the Modeling Parameters Used in Simulation of Proton Exchange Membrane Fuel Cells». IEEE, 2005.
- [38] : **Guillaume Fontès**, «Modélisation et caractérisation de la pile PEM pour l'étude des interactions avec les convertisseurs statiques». Thèse de doctorat, Institut Nationale Polytechnique,Toulouse, 2005.
- [39]: **J.C.Amphlett, Ronald f.Mann, Michael A.I.Hooper, Heidi M.Jensen, Brant A.Peppley, Pierre R.Roberrge**,«Development and application of a generalized steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell», Journal of power sources,2000
- [40]: **Jeferson M.Corrêa, Felix A.Faret, Luciane N.Canha, marcelo G.Simones**,« An electrochemical-Based fuel Cell Model Suitable for Electrical Engineering Automation Approach ».
- [41]: **Jay.T.Pukrushpan**, «Modeling and control of fuel cell system and fuel processor».
- [42]: **Brian Russel Einsla**, « High Temperature Polymers for Proton Exchange Membrane Fuel Cells»,Thèse de doctorat,The faculty of Virginia polytechnic.

## Références Bibliographies

---

[43] : **Mohammed ar, Dhalsi abdelhafidh**, «Etude et simulation d'un système hybride photovoltaïque et pile à combustible», UNIVERSITÉ AHMED DRAIA-ADRAR, 2021.