

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Amar Thelidji- Laghouat



FACULTE: Technologies

DEPARTEMENT : Electrotechnique

**MEMOIRE DE MASTER**

Présenté par :

OTMANE MOHAMED

MERAD MOHAMED ALI

DOMAINE : Sciences et Technologies.

FILIERE : Electrotechnique.

OPTION : Energies renouvelables.

**Thème**

**Etude et dimensionnement d'un système hybride  
PV-Electrolyser-PEMFC pour l'électrification d'un  
bâtiment**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Hamdi Abdelwahab	MAA	Encadrant
Birane Mouhoub	MCA	Président
Bouchiba Oum el Kheir	MCB	Examineur

Promotion : 2021/2022

« Je crois qu'un jour l'eau servira de carburant, que l'hydrogène et  
L'oxygène qui la constituent, utilisés seuls ou ensemble fourniront  
une source inépuisable d'énergie et de lumière, d'une intensité dont  
le

Charbon n'est pas capable »

Jules Verne « L'île mystérieuse » 1874

---

# REMERCIEMENTS

---

*Au nom d'Allah, le plus gracieux, le plus miséricordieux :*

*Tout d'abord, nous remercions DIEU de nous avoir donné le courage, la force et la patience pour réaliser ce modeste travail.*

*Nous tenons à exprimer notre gratitude à Monsieur Hamdi Abed Wahab pour l'honneur qu'il nous a fait. en nous guidant, pour son aide précieuse, ses remarques et ses conseils qui nous ont permis de mener à bien ce travail. Nous remercions également tous nos enseignants qui ont contribué à notre formation durant notre parcours universitaire.*

*Enfin, nous tenons à exprimer notre gratitude et nos remerciements particuliers à Messieurs Chatti et Nasri et Moulay qui nous ont apporté leur soutien et leurs encouragements durant la réalisation de ce travail.*

*Mohammed & Mohamed*

# DEDICACE

---

---

*Je remercie le Dieu miséricordieux qui m'a donné le courage et la volonté de faire ce travail.*

*Je dédie ce travail à mes parents qui ont été la source d'inspiration et de courage, qui ont inséré le sens des responsabilités qui ont tous permis que je réussisse dans mes études, afin que Dieu les bénisse avec une longue vie et une bonne santé.*

*A mon frère, qu'il trouve ici l'expression de mon affection. Tous mes vœux de réussite et de bonheur. A toute ma famille : OTHMANE .*

*A mon frère et binome: Merad Mohamed Ali . A tous mes amis*

*A tous mes collègues et surtout aux étudiants de la 2ème année master des énergie renouvelable.*

*Pour tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à rendre ce travail possible.*

*Mohamme*

# DEDICACE

---

*Je remercie le Dieu miséricordieux qui m'a donné le courage et  
la volonté de faire ce travail.*

*Je dédie ce travail à mes parents qui ont été la source  
d'inspiration et de courage, qui ont inséré le sens des  
responsabilités qui ont tous permis que je réussisse dans mes  
études, afin que Dieu les bénisse avec une longue vie et une  
bonne santé.*

*A mon frère, qu'il trouve ici l'expression de mon affection.  
Tous mes vœux de réussite et de bonheur. A toute ma famille :  
MERAD et SALMI*

*A mon frère et binôme: Othamne Mohmaed. A tous mes amis  
sans exception*

*A tous mes collègues et surtout aux étudiants de la 2ème  
année master des énergies renouvelables.*

*Pour tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à rendre ce  
travail possible*

**Mohamed**

### Table de matière

	page
Introduction générale	2
<b>CHAPITRE I : Introduction aux systèmes hybrides</b>	
introduction	5
I1 État de l'art des systèmes hybrides	5
I2 Structure du système hybride	5
I3 Les différents types de la configuration	6
I4 Configuration PV/Diesel série	6
I5 Fonctionnement du système	6
I6 Avantages et inconvénients	7
I7 Configuration PV/Diesel commuté	7
I8 Fonctionnement du système	7
I9 Avantages et inconvénients	8
I10 Configuration PV/Diesel parallèle	8
I11 Fonctionnement du système	9
I12 Avantages et inconvénients	9
I13 Système hybride Photovoltaïque-Batterie-Pile à combustible	10
I14 Système hybride Photovoltaïque-Électrolyseur-Pile à combustible	10
I15 Systèmes PV-H <sub>2</sub> existants	10
I16 Conclusion	13
<b>CHAPITRE II DESCRIPTION DES COMPOSANTS DU SYSTEME HYBRIDES PV-ELC- PAC</b>	
II1 Introduction	15
II2 Présentation générale du système hybride PV-PAC	15
II3 Principaux composants	16
II31 Générateurs photovoltaïques	16
II311 Description générale de la cellule photovoltaïque	16
II312 Différentes technologies photovoltaïques	17
II 3121 Les cellules homojonctions	17
II 3122 Les cellules hétérojonctions	18

## Table de matière

---

II 3123 Technologie sandwiches	18
II 3124 Les matériaux amorphes	18
II 3125 Technologie semi-conductrice organique	18
II313 L'énergie de gap	18
II 314 Panneaux photovoltaïques	19
II315 Performances et caractéristiques électriques courant/tension d'un module photovoltaïque	19
II 316 Interface des générateurs photovoltaïque	20
II317 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque	21
II 317 1 Les avantages	21
II317 2 Les inconvénients	21
II32 Piles à combustible	21
II321 Historique	21
II322 Principe de fonctionnement	22
II323 La pile élémentaire	22
II324 Énergies mises en jeu	24
II325 Différentes filières technologiques de piles à combustible	24
II326 Les avantages et inconvénients de la pile à combustible	26
II3261 Les avantages	26
II3262 Les inconvénients	27
II327 Performance et caractéristiques électriques et paramètres	28
II328 Rendement du système	29
II329Peleferique	30
ii3210 Les différent utilisation	31
II33 L'électrolyseurs	32
II331 Différentes technologies	32
II332 La technologie à membrane, équivalente aux PEMFC	32
II3321 La technologie alcaline	32
II3322 La technologie a vapeur d'eau a hôte température, équivalente au SOFC	34
II333 Carestirstique electrique et parametre	35

## Table de matière

---

II3344 pirifirique	36
II335 Applications et commercialisations	37
II4 conclusion	37
<b>Chapitre III Modélisation Du Système Hybride PV-EL-PAC</b>	
III1 Introduction	39
III2 Les modèles des composants	39
III21 Les panneaux photovoltaïques	39
III 22 Modélisation d'un panneau photovoltaïque	39
III 23 Performances du générateur photovoltaïque implémenté	41
III 24Raccordement série	42
III25 Raccordement en parallèle	43
III3 Électrolyseurs et piles à combustible	43
III 30 L'électrolyseur	43
III 31 Modèle électrochimique	44
III 32 Modèle thermique	44
III 33 Taux d'hydrogène produit	46
III 34 Performance du modèle de l'électrolyseur	46
III 4 Pile à combustible	47
III 41 Modèle électrochimique de la pile à combustible PEMFC	47
III 5 Caractéristiques de polarisation d'une pile à combustible PEMFC	49
III 51Polarisation d'activation	49
III 52 Polarisation ohmique	50
III 53 Polarisation de concentration	50
III 54 Potentiel réel global	51
III 6 Modèle électrique dynamique de la pile à combustible	52
III 61 Modelé électrique dynamique de la PEMFC	52

## Table de matière

---

III62 Dimensionnement de stack	53
III 7 Stockage d'hydrogène	53
III 71 Technologie de stockage d'hydrogène	54
III 711 Stockage sous forme gazeuse	54
III 712 Stockage sous forme liquide	54
III 713 Stockage sous forme solide	55
III 72 Comparaison des différentes techniques de stockage	55
III 8 Conclusion	56
<b>CHAPITRE IV Etude technico-économique du système PV-EL-PAC</b>	
IV1 Introduction	58
a-HOMER	58
IV2 Présentation du système d'étude	58
IV3 Principe de fonctionnement du système	59
IV31 Procédure d'évaluation de coût global du système dans l'HOMER	59
IV311 Coût initial ( $C_i$ )	59
IV312 Coût de remplacement ( $C_r$ )	60
IV313 Coût d'opération et de maintenance ( $C_o$ )	60
IV314 Coût de salvage ( $C_s$ )	60
IV315 Coût total net actuel du système (NPC)	60
IV316 Déclaration des contraintes du système dans HOMER	60
IV317 Sélection le temps de fonctionnement du composant du système	61
IV38 Déclaration les données nécessaires des composants	62
IV4 Etude technico-économique Système PV-Electrolyseur- PAC	63
IV41 Description le site d'étude	63
IV42 Analyse de la Charge	64
IV43 Potentiel solaire de la ville de Laghouat	66
IV5 L'optimisation du système PV-PAC –Electrolyseur dans HOMER	67
IV51 Le générateur photovoltaïque	67
IV52 La pile à combustible	68
IV53 L'électrolyseur	68

## Table de matière

---

IV54La batterie	68
IV55Le réservoir d'hydrogène	69
IV56Le convertisseur	69
IV57Données économiques	69
IV6Interprétation des résultats de simulation	69
IV61Panneaux solaires (PV)	70
IV62Pile à combustible	71
IV65Elctrolyseur	71
IV66Production mensuelle moyenne d'hydrogène	71
IV7Conclusion	73
Conclusion Générale	75
Références Bibliographie	78

**Les Liste FIGURES**

<b>CHAPITRE I INTRODUCTION AUX SYSTEMES HYBRIDES</b>	<b>page</b>
Figure.1.1 Système hybrides PV/Diesel Série	6
Figure.I.2 Système hybride PV/Diesel Commuté	7
Figure.I.3 Système hybride PV/Diesel parallele	8
<b>CHAPITRE II DESCRIPTION DES COMPOSANTS DU SYSTEME HYBRIDES PV-ELC-PAC</b>	
Figure II.1 : Chaîne de production d'énergie propre	16
Figure II.2. Principe de la conversion photon-électron dans un système à deux niveaux d'énergie	17
Figure II.3. fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	17
Figure II.4. Caractéristiques I-V et P-V typique d'un générateur photovoltaïque (PV)	19
Figure II.5. Courbe caractéristiques d'un champ solaire de 85W	20
Figure II.6. Assemblage d'une pile à combustible PEMFC	22
Figure II.7. Cellule d'une pile a combustible PEM (le polymère NAFION®)	23
Figure II.8. Caractéristique électrique d'une cellule de pile à combustible basse température	28
Figure II.9. Courbes U-I et P-I d'une pile PEM (35 cellules de 232 cm <sup>2</sup> ) en fonction de la concentration d'oxygène (P= 3,43 bar)	30
Figure II.10. Schémas de principe de l'électrolyseur Alcalin	34
Figure II.11.comparison entre les carectirestique electrique des 3 technologie	35
Figure II.12.carecterestique electrique un électrolyseur ancaline	35
Figure II.13 influence de la tempurature sur le randement faradique d un electrolyseur alcaline	36
<b><u>Chapitre III. Modélisation Du Système Hybride PV-EL-PAC</u></b>	
Figure III .1 : circuit équivalent à une diode d'une cellule PV	39
Figure III .2 Caractéristiques V-I et V-P d'un module PV	41
Figure III.3 : influence de l'éclairement et de la température sur les performances d'un	42
Figure III.4. Raccordement en série	42
Figure III.5. Raccordement en parallèle	43
Figure III.5. influence de la température sur la caractéristique I-V de EL	46
Figure III.7. la réponse en température du modèle d'électrolyseur implémenté	47

## Les Liste FIGURES

---

Figure: III.8. courbe de polarisation d'une pile à combustible	48
Figure III .9 : schéma électrique équivalent de la PAC	52
Figure. III.10 : Modularité d'un stack : 3 exemples de conception d'une PAC de 5 Kv	53
Figure III.11: réservoir cryogénique développé par magna Steyr	55
Figure III.12: stockage d'hydrogène sous forme solide	55
<b>CHAPITRE IV Etude technico-économique du système PV-EL-PAC</b>	
Figure.IV.1 Le schéma global du système étudié	59
Figure.IV.2 Fenêtre de déclaration des contraintes du système	61
Figure. IV.3 Le choix de temps de fonctionnement de composant	62
Figure. IV.4 Lancement de simulation dans HOMER	62
Figure.IV.5.Schéma générale du système PV-PAC –Electrolyseur sur HOME	63
Figure.IV.6. Emplacement géographique de site de Laghouat (PVSys7.1 )	63
Figure. IV.7 Le profil de charge journalière suivant les saisons	66
Figure. IV.8 Irradiation solaire annuelle	67
Figure. IV.9.DMAP d'irradiation solaire globale horizontale	67
Figure. IV.10.Le temps de fonctionnement de la pile	68
Figure. IV.11. Résultats de l'optimisation du système (bâtiment administratif)	69
Figure.IV.12. Conception du système hybride	70
Figure.IV.13. La quantité d'énergie totale quotidienne produite par le PV pendant une année	70
Figure.IV.14.La quantité d'énergie totale quotidienne produite par le PAC pendant une année	71
Figure.IV.15.Le temps de fonctionnement de l'électrolyseur d'eau	71
Figure.IV.16.Résultat de production hydrogène pendant une année	72

**Les Liste TABLEAUX**

	<b>page</b>
<b>CHAPITRE I INTRODUCTION AUX SYSTEMES HYBRIDES</b>	
Tableau .I.1 Présentation des projets de système hybride	11
Tableau I.2 Caractéristiques des systèmes installés et présentés dans le tableau précédent	12
<b>CHAPITRE II DESCRIPTION DES COMPOSANTS DU SYSTEME HYBRIDES PV-ELC-PAC</b>	
Tableau II. 1 Caractéristique des matériaux photovoltaïque	19
Tableau II.2. Les catégories des piles à combustible	25
Tableau II.3 Caractéristiques techniques des piles à combustible	26
<b>CHAPITRE IV Etude technico-économique du système PV-EL-PAC</b>	
Tableau IV.1 La consommation des appareils considérés dans un bâtiment	64
Tableau IV.2.Estimation de la consommation de puissance en décembre en K	65

### Nomenclature

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

## Liste des Symboles

---

### Nomenclature

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



# **Introduction générale**



La prise de conscience des problèmes environnementaux et climatiques importants, combinés à la diminution des ressources en énergies fossiles et à l'augmentation des coûts énergétiques appellent à des efforts concertés pour développer un système énergétique durable. Afin de remédier à ces problèmes et d'en réduire les risques et les coûts, les centrales au charbon sont remplacées partout dans le monde par des éoliennes, des panneaux solaires, des bio-huiles, des sources d'énergie à base d'eau et d'hydrogène.

Ces énergies sont exploitées en mono source ou en hybride et en mode autonome ou connectés au réseau. Vu la dépendance de leur production des conditions météorologiques, ces sources sont intermittentes. Ainsi, l'association de plusieurs sources (mode hybride) s'avère utile pour couvrir les saisons de l'année. Afin d'assurer l'équilibre production-consommation, des systèmes de stockage d'énergie sont nécessaires.

De plus, des sources d'énergie complémentaires telles que les groupes électrogènes sont sollicités en cas de manque d'énergies renouvelables. Il existe plusieurs types des systèmes hybrides de production électrique autonomes comme le Photovoltaïque-Pile à combustible (PV-FC), Éolienne-Pile à combustible (W-FC) ou le Photovoltaïque-Éolienne-Pile à combustible (PV- W-FC)

L'hydrogène est l'un des vecteurs potentiels d'énergie d'avenir pour le stockage de l'électricité Il est particulièrement intéressant pour valoriser des énergies renouvelables ou pour limiter les impacts environnementaux liés au carbone. Il peut également permettre une indépendance énergétique pour des systèmes isolés. Dans le contexte actuel de l'évolution du système énergétique, il est pertinent de s'appuyer sur des technologies avancées utilisant l'hydrogène, en particulier la pile à combustible (PAC) dont il est question de notre étude.

Les PEMFC comptent parmi les générateurs électriques les plus efficaces, avec une densité d'énergie élevée, de hautes performances et une grande robustesse [2]. Elles peuvent être utilisées dans les téléphones mobiles, les voitures, les avions et les navettes spatiales etc. La recherche et le développement de systèmes de piles à combustible PEM pour de multiples applications se sont développés ces dernières années. Dans ce contexte, la maîtrise du contrôle au niveau des piles à combustible PEM est aujourd'hui bien avancée, afin de produire et d'exploiter une énergie propre.

Dans ce mémoire, nous présentons une étude technico-économique à l'aide du logiciel HOMER d'un système hybride conçu pour alimenter un bâtiment administratif, le système étudié est composé essentiellement du générateur photovoltaïque, une pile à combustible et l'électrolyseur de l'eau pour produire l'hydrogène avec la présence des batteries et des convertisseurs.

Nous avons constitué notre travail en quatre parties

Dans le premier chapitre, nous décrivons les systèmes hybrides.

Dans le deuxième chapitre, nous donnons une brève description des principaux composants du système sélectionné adaptés à un système hybride PV-PAC.

## **Introduction générale**

---

Dans le troisième chapitre, nous présentons les modèles essentiels à la simulation développée afin de modéliser le fonctionnement du système. Ces modèles sont basés sur des équations empiriques.

Dans le quatrième chapitre nous présentons une description générale du logiciel HOMER et les diverses opérations qui peut être effectuées, en suite nous entamons l'étude technico-économique de l'installation PV-PAC qui peut satisfaire l'alimentations de notre bâtiment administratif.

Enfin nous terminons notre travail par une conclusion générale.



**CHAPITRE I**  
**INTRODUCTION AUX**  
**SYSTEMES HYBRIDES**



## I. Introduction

Ce chapitre présente une description technique de quelques différentes configurations hybrides de système d'énergie. Elle inclut également des notes au sujet des topologies, de modularisation, et d'étalonnage hybrides de système d'énergie.

### I.1.État de l'art des systèmes hybrides [14]

Le terme « Système d'Energie Hybride » fait référence aux systèmes de génération d'énergie électrique multi-sources. Il s'agit de systèmes complexes associant différentes sources renouvelables ou bien combinées avec des sources conventionnelles (générateur diesel...), différents éléments de stockage et différentes charges. Ils permettent la compensation du caractère intermittent des sources renouvelables et offrent un rendement énergétique global plus élevé.

Le système hybride de production de l'énergie dans sa vue la plus générale, est celui qui combine et exploite plusieurs sources disponibles facilement mobilisables. Le système qui nous intéresse regroupe deux parties pour la production de l'énergie.

Les systèmes d'énergie hybrides peuvent être connectée aux réseaux électriques ou autonomes, pour le premier cas La production énergétique hybride est alors centralisée et mise en réseau entre plusieurs sites de production et de consommation. La connexion des sources hybrides aux réseaux électriques doit respecter certaines normes qui ne sont pas forcément spécifiques au domaine d'énergies renouvelables.

Dans les sites isolés où le réseau n'existe pas, il est donc pratique et dans la majorité des cas nécessaire que le système hybride possède une autonomie totale. Il est donc impératif d'associer un élément de stockage de type accumulateur électrochimique ou hydrogène au système dans la mesure où la consommation et la production sont fortement découplées

### I.2 .Structure du système hybride

Pour structurer un système hybride, trois critères peuvent être pris en compte :

-La présence ou non de sources d'énergie classique, comme un groupe électrogène, une micro turbine à gaz, etc.

-La présence ou non de dispositifs de stockage. La présence d'un stockage permet de satisfaire la demande des charges électriques pendant les périodes d'absence d'une source primaire à convertir en électricité (soleil, vent). Ces dispositifs peuvent être des batteries rechargeables, des électrolyseurs avec réservoir d'hydrogène, etc.

-La structure du système peut contenir des modules photovoltaïques, une éolienne, un convertisseur d'énergie hydraulique ou une combinaison de ces sources. Un critère important pour la sélection des sources utilisées est le potentiel énergétique disponible qui dépend de l'endroit d'installation du système hybride. Un autre facteur déterminant est le profil de consommation de la charge électrique alimentée. Son importance détermine le besoin d'une source supplémentaire d'un dispositif de stockage et/ou d'une source conventionnelle.

### I.3. Les différents types des configurations

#### I.4. Configuration PV/Diesel série

Schéma synoptique du système d'énergie PV/Diesel série

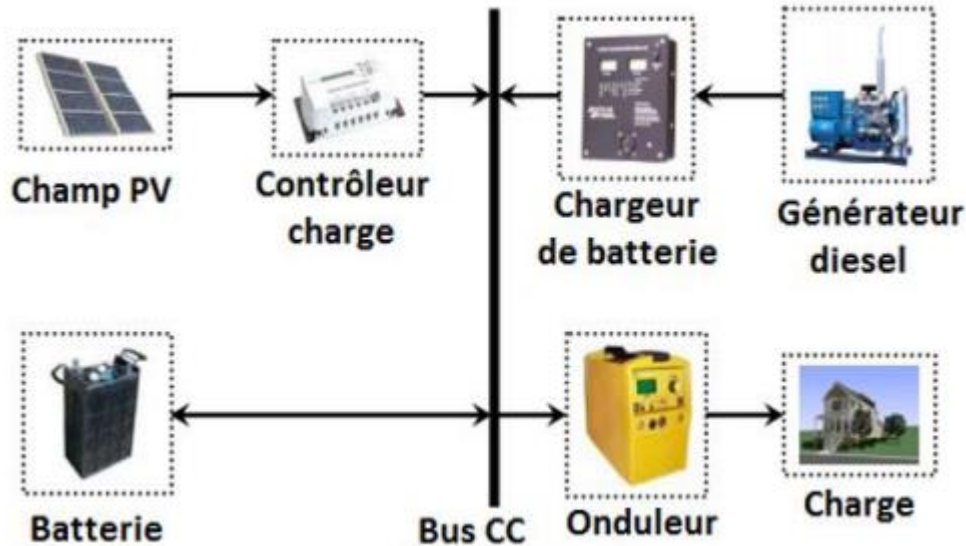


Figure I 1: Système hybrides PV/Diesel Série

#### I.5. Fonctionnement du système [7]

Dans ce type de configuration, le générateur diesel est connecté au bus à courant continu. La connexion peut se faire directement (dans le cas d'un générateur à courant continu) ou à travers un redresseur. Le générateur peut alimenter la charge à travers des convertisseurs électroniques ou charger la batterie. Lorsque l'énergie produite par le champ photovoltaïque et l'énergie stockée sont suffisantes pour répondre à la demande de la charge, le groupe diesel est débrayé. La puissance en courant continu fournie par le champ PV et la batterie est convertie en courant alternatif par un onduleur. Il faut noter que dans la plupart de ce type de configurations, le transit d'une grande partie de l'énergie par la batterie diminue le rendement du système.

Le régime de fonctionnement du générateur dépend de la demande en énergie, de l'état de charge de la batterie et de la production du champ PV. Quand l'énergie produite par le champ est en excès, cela sert à charger la batterie, et celle-ci se décharge quand l'énergie produite n'est pas suffisante.

Le contrôleur solaire prévient la surcharge et la décharge de la batterie. On peut également faire appel à un convertisseur CC/CC (MPPT) qui permettra de faire fonctionner le champ à son point maximum de puissance. On peut adjoindre un système automatique de mise en marche et arrêt du générateur diesel si nécessaire.

## I.6. Avantages et inconvénients

### Avantages

-Un schéma électrique simplifié à cause d'une absence de commutation des sources d'énergie en courant alternatif.

-La mise en marche du générateur diesel n'est pas liée avec une interruption de l'alimentation électrique.

-Grâce à l'onduleur, le consommateur peut être alimenté avec une tension dont la forme, l'amplitude et la fréquence sont convenables.

-Un dimensionnement facile du générateur.

### Inconvénients

-L'onduleur ne peut pas travailler en parallèle avec le générateur diesel. C'est pourquoi il doit être dimensionné de manière à ce qu'il puisse couvrir la charge maximale possible.

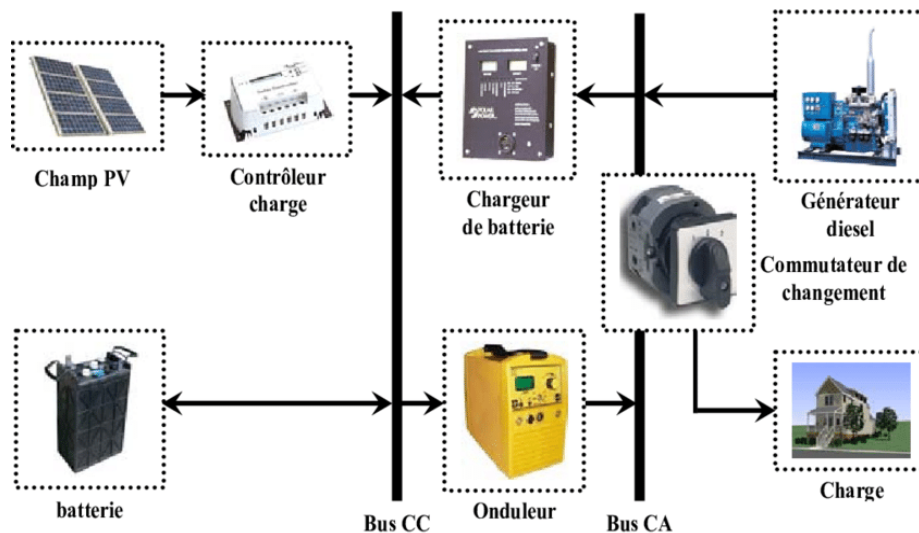
-La batterie doit avoir une grande capacité.

-Un rendement relativement faible dans le cas d'un générateur diesel à courant alternatif, parce que la puissance fournie est convertie deux fois avant d'arriver au consommateur.

-Une avarie éventuelle de l'onduleur provoque une coupure totale de l'alimentation électrique.

## I.7. Configuration PV/Diesel commuté

Schéma synoptique du système d'énergie PV/Diesel commuté



FigureI 2: Système hybride PV/Diesel Commuté

## I.8. Fonctionnement du système [2]

Dans ce type de configuration, le consommateur peut être alimenté soit par la source

conventionnelle, soit par l'installation photovoltaïque et la batterie via l'onduleur, mais le fonctionnement en parallèle est toujours impossible [2]. La batterie peut être chargée par le champ PV et le diesel par l'intermédiaire d'un redresseur.

Il n'y a pas des pertes de conversion significatives liées à la production du générateur diesel (en comparaison par rapport à la configuration série). En principe, la puissance produite par le générateur diesel est supérieure à la demande de la charge et l'excès est utilisé pour charger la batterie. Le diesel est arrêté lorsque la demande est faible et qu'elle peut être satisfaite par le champ photovoltaïque et la batterie. La complexité du système implique l'utilisation d'un contrôle automatique à la place de la commande manuelle.

### I.9. Avantages et inconvénients

#### Avantages

-Le générateur peut fournir l'énergie produite directement à la charge, ce qui augmente le rendement du système et diminue la consommation du carburant .

-Une avarie de l'onduleur n'engendrera pas l'arrêt complet de l'alimentation électrique, parce que la charge peut être satisfaite par le générateur diesel .

-L'onduleur peut fournir au consommateur la tension désirée en forme et en valeur.

#### Inconvénients

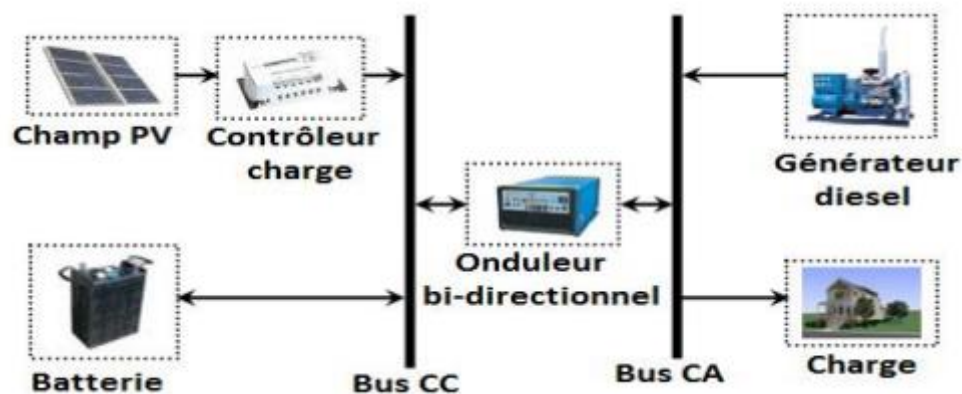
-L'apparition d'une coupure instantanée lors de la commutation des sources ;

-Le générateur diesel et l'onduleur doivent être dimensionnés pour la consommation maximale du système .

- Une construction complexe.

### I.10. Configuration PV/Diesel parallèle

Schéma synoptique du système PV/Diesel parallèle



FigureI 3: Systèmes hybride PV/Diesel parallèle

### **I.11.Fonctionnement du système [2]**

Dans cette configuration, toutes les sources peuvent alimenter la charge séparément à faible et moyenne demande mais également suppléer les pointes en combinant les sources.

Le générateur diesel est connecté au bus de courant alternatif. L'installation photovoltaïque et la batterie sont liées sur un autre bus de courant continu. Les deux bus sont connectés à l'aide d'un convertisseur électronique bidirectionnel. Il peut travailler soit comme redresseur, lorsque le générateur diesel couvre la consommation électrique et participe au chargement de la batterie, soit comme onduleur quand la charge est satisfaite par les panneaux photovoltaïques et/ou la batterie. La charge peut être alimentée par les deux bus simultanément. On diminue le nombre des éléments dans le système en utilisant un seul convertisseur. De plus, les coûts du câblage et l'installation du système peuvent être diminués par l'intégration de toutes les composantes dans une seule unité, ce qui est avantageux, mais peut empêcher l'augmentation de la taille du système par l'ajout de nouveaux composants si la demande en électricité augmente.

L'association du générateur diesel et de l'onduleur permet l'alimentation d'une charge supérieure à la charge alimentée par chaque élément seul. La capacité du système est deux fois plus grande dans cette configuration. En outre, la possibilité de synchroniser l'onduleur avec le générateur diesel permet une meilleure flexibilité du système. Enfin, la puissance nominale du générateur diesel peut être diminuée, ce qui augmente la part de l'énergie directement utilisée et conduit donc à une augmentation du rendement du système.

### **I.12.Avantages et Inconvénients de la configuration**

#### **Avantages**

-Les composants des systèmes n'ont pas besoin d'être dimensionnés pour la charge totale car le consommateur peut être alimenté par les deux sources en même temps ;

-Un meilleur rendement, parce que les sources fonctionnent avec une puissance plus proche de leur puissance nominale. De plus, il n'y a pas de conversion de l'énergie produite par le générateur ;

-Baisse du nombre des convertisseurs électroniques, ce diminue le câblage nécessaire et l'investissement initial pour la construction du système hybride ;

-Une avarie du convertisseur initial électronique ne provoque pas de coupure de l'alimentation de la charge.

#### **Inconvénients**

-Le contrôle automatique est obligatoire pour le fonctionnement correct du système ;

-Le convertisseur électronique doit fournir une tension sinusoïdale, pour que la synchronisation avec le générateur diesel soit possible

-Nécessité d'une personne qualifiée

-Le bus continu est plus difficile à contrôler

### **I.13. Système hybride Photovoltaïque-Batterie-Pile à combustible**

Le générateur diesel dans ce système est remplacé par une pile à combustible. La pile à combustible est employée comme générateur de secours. Quelques différences de principe existent entre un générateur diesel et une pile à combustible qui affecte la conception, la taille et la stratégie de fonctionnement dans un système hybride. Par exemple, un générateur diesel fournira la puissance évaluée à la charge en quelques secondes après, tandis que le système de pile à combustible fournira la puissance évaluée avec un retard et le rendement devrait seulement être augmentés lentement après le commencement. Un avantage significatif de la pile à combustible comme générateur de secours au-dessus du générateur de diesel ou d'essence est l'efficacité élevée de rendement de la pile à combustible. Considérant qu'un générateur 1kW diesel réalise des efficacités totales entre 8-15% [Benz-03], un système semblable de pile à combustible peut réaliser l'efficacité jusqu'à de 50% une fois fonctionné avec l'hydrogène (H<sub>2</sub>) et l'oxygène (O<sub>2</sub>). Les générateurs diesel ont besoin des coûts d'entretien élevés, ils sont bruyants et émettent des gaz à effet de serre sans interruption. En revanche, les piles à combustible ont des propriétés techniques très efficaces pour les systèmes d'énergies autonomes, tels que le niveau bas de bruit et sans gaz à effet de serre, particulièrement quand de l'hydrogène pur est employé comme carburant. En raison de leur coût d'entretien très bas, les piles à combustible produisent de l'électricité au coût inférieur que les générateurs diesel conventionnels malgré leur charge de placement initiale plus élevée.

### **I.14. Système hybride Photovoltaïque-Électrolyseur-Pile à combustible**

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

### **I.15. Systèmes PV-H<sub>2</sub> existants**

Les projets d'énergie hybride couplant un générateur renouvelable et une pile à combustible via un système de stockage par l'hydrogène sont étudiés depuis 1986 (Tableau 1 et Tableau 2). Certaines études ont évalué les rendements de conversion et déterminé les problèmes techniques des appareils électrochimiques. D'autres études se sont concentrées sur l'optimisation des systèmes en terme de dimensionnement et de stratégie de contrôle [1].

Tableau I 1 : Présentation des projets de système hybride [3]

Nom du projet / année	Instituts / compagnies / lieux	Description de l'étude	Puissance installée
<b>Solar Wasserstoff Bayern 1986</b> [12]	Compagnie d'électricité SWB, Bayernwerk, BMW, Linde et Siemens, Neunburg Vorm Wald, <b>Allemagne</b>	Projet de démonstration de production d'électricité et stockage. Utilisation de l'hydrogène à échelle industrielle.	370 kW <sub>c</sub>
<b>HYSOLAR 1986</b> [12]	DLR, Stuttgart, <b>Allemagne</b>	Identification des applications PV-H <sub>2</sub> . Production d'hydrogène jusqu'en 1992. Utilisation H <sub>2</sub> .	2 kW <sub>c</sub> , 10 kW <sub>c</sub> et 350 kW <sub>c</sub>
<b>NEMO 1989</b> [13]	Helsinki University of Technology, Espoo, <b>Finlande</b>	Démonstration de la possibilité technique d'un système PV-H <sub>2</sub> 100% autonome.	1,3 kW <sub>c</sub>
<b>Oldenburg 1990</b> [14]	Renewable Energy Group, Oldenburg, <b>Allemagne</b>	Evaluation des systèmes H <sub>2</sub> et problèmes techniques.	6,2 kW <sub>c</sub> 5 kW WT 12 kW GD = 23,2 kW
<b>INTA 1990</b> [15]	INTA Energy Laboratory, Mazagõn, <b>Espagne</b>	Production d'hydrogène solaire, puis stockage dans un métal hydrure et utilisation d'une PAFC. Système non intégré.	7 kW <sub>c</sub>
<b>SSHP 1991</b> [16]	Schatz Solar Hydrogen Project, Humbolt State University, Arcata, <b>USA</b>	Démonstration que l'hydrogène est un bon stockage pour l'énergie solaire et plus généralement que les PV-H <sub>2</sub> systèmes sont des sources d'énergie sécurisées et fiables.	9,2 kW <sub>c</sub> pompe d'aquarium
<b>ATEL 1991</b> [17]	Aere-Tessin Electricity Supply Co. + Paul Scherrer Institute, <b>Suisse</b>	Banc d'essai : production d'hydrogène solaire et utilisation dans une pile à combustible. Système non intégré.	90 kW <sub>c</sub>
<b>PECS 1992</b> [18]	Photovoltaic Energy Conversion System, The Copper Union, New York, <b>USA</b>	Démonstration et évaluation.	150 W <sub>c</sub>
<b>FhG-ISE 1992</b> [19]	Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, Freiburg, <b>Allemagne</b>	Démonstration en site isolé. Maison solaire, isolée du réseau.	4,2 kW <sub>c</sub>
<b>PHOEBUS 1993</b> [20]	Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich, <b>Allemagne</b>	Développement et tests d'un système solaire-hydrogène autonome. Application réelle : Bibliothèque, isolée du réseau.	43 kW <sub>c</sub>
<b>SAPHYS (JOULE II) 1990</b> [21]	ENEA-energy area advanced energy technologies (It), Institut For Energy (No), KFA (FZJ, De) et CEE, <b>Italie</b>	Enquête et tests sur les technologies « hydrogène »	5,6 kW <sub>c</sub>
<b>HRI 2000</b> [22]	Institut de recherche sur l'hydrogène, Trois-Rivières, <b>Québec</b>	Tests expérimentaux pour déterminer les meilleures méthodes de dimensionnement et de stratégies de contrôle.	1 kW <sub>c</sub> 10 kW WT =11 kW

**Tableau I 2. Caractéristiques des systèmes installés et présentés dans le tableau précédent [3]**

Nom du projet / année	PV	EL	ST (kWh/PCS)*	FC	Batteries	Architecture électrique	modélisation
SWB 1986	370 kW <sub>c</sub>	2 x 100 kW alc. à Pa + 100 kW alc. à 30 bar	5 000 m <sup>3</sup> H <sub>2</sub> + 500 m <sup>3</sup> O <sub>2</sub> 30 bar (532 kWh H <sub>2</sub> )	6,5 kW alc. + 79,3 kW PA + 10 kW PEM	Raccordé au réseau (surplus PV)	Bus DC 300-453V	JULSIM (PHOEBUS) SIMWELLY
HYSOLAR 1986	10 kW <sub>c</sub>	10 kW alc.		PEM			HYSOLAR
1991	350 kW <sub>c</sub>	350 kW alc.	compressé	FC			HYSOLAR
NEMO 1989	1,3 kW <sub>c</sub>	0,8 kW alc. 30 bar	8 m <sup>3</sup> - 25 bar (710 kWh)	0,5 PAFC	14 kWh	Bus DC 30V	H2PHOTO (Turbo Pascal)
Oldenburg 1990	6,2 kW <sub>c</sub> PV + 5 kW WT + 12 kW DG	0,8 kW alc. - Pa	0,25 m <sup>3</sup> H <sub>2</sub> - 120 bar (106 kWh)	0,6 kW alc.	104 cellules - 300 Ah - 62,4 kWh	Bus DC 190-250V DC/DC pour chaque appareil	INSEL
INTA 1990	7 kW <sub>c</sub>	5,2 kW alc.	24 m <sup>3</sup> MH + 8,8 m <sup>3</sup> - 200 bar (6 250 kWh)	10 kW PA + 2,5 kW PEM + 5 kW PEM		Couplage direct PV-EL	
SSHP 1991	9,2 kW <sub>c</sub>	5,76 kW alc. 7,9 bar	5,7 m <sup>3</sup> - 7,9 bar (160 kWh)	1,5 kW PEM	24 V - 220 Ah	Bus DC 20-30V	PVINTER
ATEL 1991	90 kW <sub>c</sub>	90 kW PEM (ABB)		2 x 3 kW PEM			
PECS 1992	150 W <sub>c</sub> PV	95,2 W PEM 7 bar	9 m <sup>3</sup> - 7 bar Metal Hydrure			Couplage direct PV-EL	PECS II
FhG-ISE 1992	4,2 kW <sub>c</sub>	2 kW PEM	15 m <sup>3</sup> H <sub>2</sub> + 7,5 m <sup>3</sup> O <sub>2</sub> 30 bar (1600 kWh)	0,5kW PEM - 12V	48V - 400 Ah = 19,2 kWh	Bus DC 48 V DC/DC FC	TRNSYS (Fortran)
PHOEBUS 1993	30 kW <sub>c</sub>	26 kW alc. 7 bar	25 m <sup>3</sup> - 120 bar H <sub>2</sub> + 20 m <sup>3</sup> - 70 bar O <sub>2</sub> (~10 MWh)	5,6 kW PEM	220 V - 304 kWh	Bus DC 220V	SIMELINT
SAPHYS (JOULE II) 1994	5,6 kW <sub>c</sub>	5 kW alc. 20 bar	15 m <sup>3</sup> 20 bar (106 kWh)	3 kW PEM 22-30 V	34 V - 1500 Ah - 53 kWh	Bus DC 36V DC/DC EL et FC	JULSIM (PHOEBUS) SIMWELLY
HRI 2000	10 kW WT + 1 kW <sub>c</sub> PV	5 kW alc. 7 bar	3,8 m <sup>3</sup> - 10 bar (125 kWh)	5 kW PEM (Ballard) 24 V	48 V	Bus DC 48V	

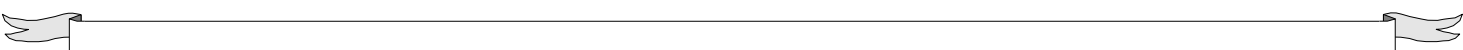
**I.16.Conclusion :**

Dans ce chapitre Une brève description des systèmes d'énergie hybride a été présenté Les principales notions liées a la technologie utilisé dans les systèmes a énergies hybrides Ont été données, ainsi que les avantages et les inconvénients de ces systèmes



# **CHAPITRE II**

## **Description Des Composants Du Système Hybrides PV-EL-PAC**



**II. Description Des Composants Du Système Hybrides PV-PAC****II.1. Introduction**

Dans ce premier chapitre nous allons faire une description non exhaustive de chaque équipement installé dans le système hybride PV-PAC.

**II.2. Présentation générale du système hybride PV-PAC**

Le système présenté par la figure 4, montre le champ photovoltaïque (PV) qui alimente directement l'utilisateur en premier lieu.

L'excédent solaire est stocké sous forme chimique. Avec cette énergie un électrolyseur (EL) dissocie l'eau en hydrogène et oxygène. Le gaz obtenu est stocké sans perte quel que soit le temps de stockage.

Lorsque le champ solaire ne peut pas fournir la totalité de la demande d'électricité, la pile à combustible est connectée. Elle régénère l'électricité stockée en recombinaison l'hydrogène et l'oxygène.

La pile à combustible (PAC) produit de l'eau pure qui est stockée pour approvisionner l'électrolyseur.

Le système hybride PV-PAC est composé de :

- Un générateur solaire
- Un système de stockage d'énergie
- Un électrolyseur,
- Une unité de stockage des gaz
- Et d'une pile à combustible.

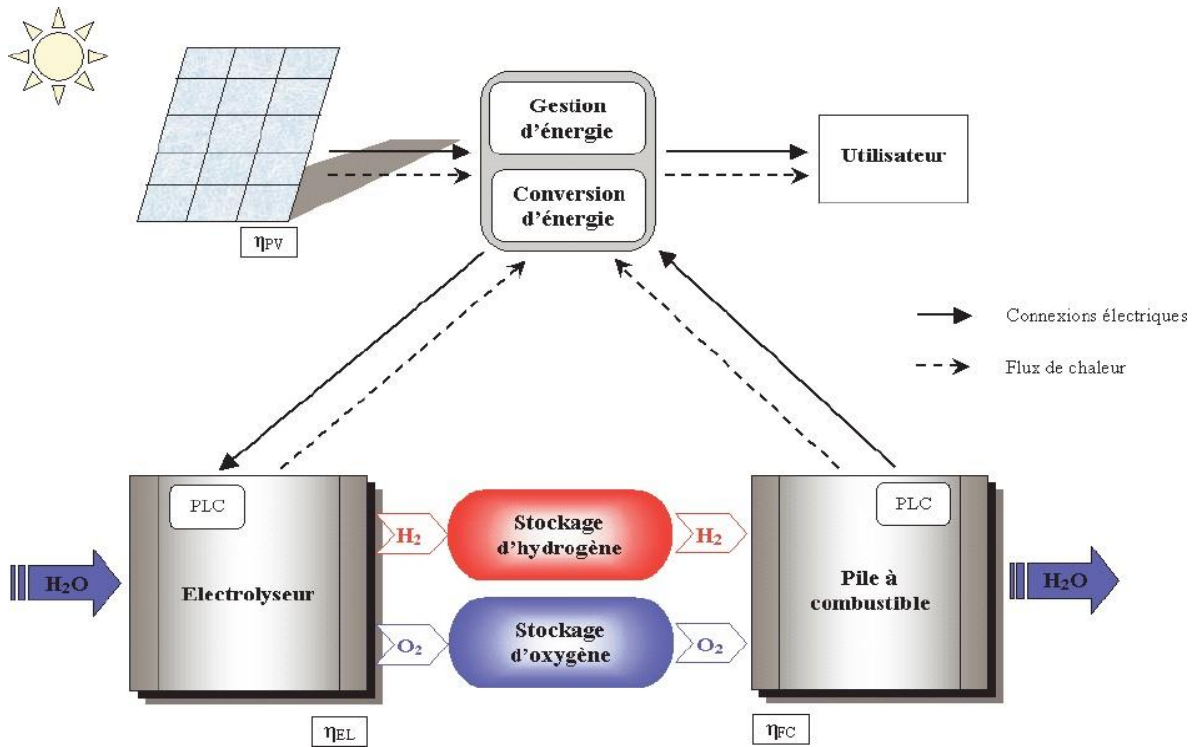


Figure II 1 : Chaîne de production d'énergie propre

### II.3. Principaux composants

L'objectif est de dimensionner le système PV-PAC afin de l'optimiser en terme de performance, paramètres et de coût (minimiser le nombre de composants; nombre de panneaux solaires, nombre d'éléments de la pile et de l'électrolyseur, dimensionner les puissances électriques, volumes de gaz à stocker, etc.)

#### II.3.1. Générateurs photovoltaïques

Les cellules solaires photovoltaïques sont des semi-conducteurs capables de convertir directement la lumière en électricité. Cette conversion, appelée effet photovoltaïque, a été découverte par E. Becquerel en 1839. L'utilisation des cellules solaires débute dans les années quarante dans le domaine spatial. Les recherches d'après guerre ont permis d'améliorer leurs performances et leur taille. Aujourd'hui, les laboratoires de recherche et les industries travaillent en collaboration pour développer de nouveaux concepts ou de nouveaux procédés susceptibles d'améliorer les performances électriques et de réduire les coûts des cellules solaires. C'est ainsi que les modules photovoltaïques modernes, composés de cellules interconnectées, ont largement prouvé leur efficacité et leur haute fiabilité.

##### II.3.1.1. Description générale de la cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque ou la photopile transforme directement l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique. Sous l'effet d'un rayonnement lumineux incident, les électrons des bandes de valence du semi-conducteur vont pouvoir passer dans la bande de

conduction et devenir libres (figure 5). Ce phénomène va engendrer au sein de la structure du semi-conducteur la création de paire électron-trou. Ceux-ci, sous l'effet de la barrière de potentiel, vont s'accumuler sur chacune des faces extérieures des zones P et N. Ainsi, une ddp entre les faces extérieures de la jonction est créée.

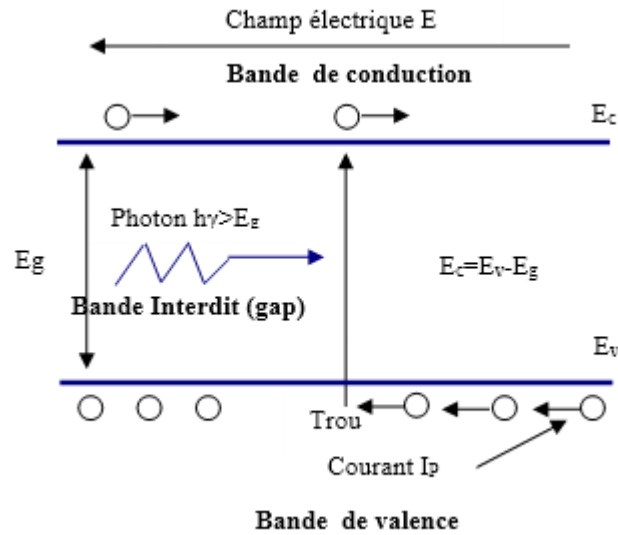


Figure II 2. Principe de la conversion photon-électron dans un système à deux niveaux d'énergie

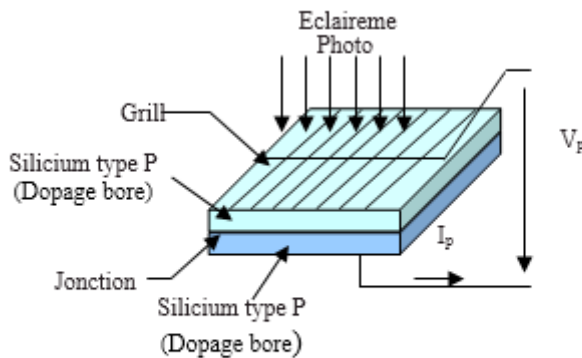


Figure II 3. Aspect d'une cellule

### II.3.1.2. Différentes filières technologiques de pile photovoltaïque

La conception de la pile photovoltaïque fait appel à des technologies multiples:

#### II. 3.1.2.1. Les cellules homojonctions

C'est-à-dire des jonctions PN au sein d'un même semi-conducteur (la quatrième colonne de la classification périodique par exemple silicium ou germanium) par implantation d'impuretés de type P (dopant de la colonne III (bore) ne possède que 3 électrons périphériques) ou N (la V colonne qui possède 5 électrons périphériques, du phosphore par exemple). Ces

dernier ont la meilleure efficacité, qui varie généralement de 13% à 18%. Leur durée de vie est habituellement de plus de 25 à 30 ans.

#### II. 3.1.2.2. Les cellules hétérojonctions

Sont fabriquées à partir de deux semi-conducteurs différents, les colonnes 2, 3, 5, et sous formes de composés dits III-V et II-VI qui permettent des liaisons assurant une dernière couche électronique à 8 électrons (par exemple, composés de cuivre et de cadmium), ces cellules ont une efficacité légèrement inférieure, soit de 12 à 15%.

#### II. 3.1.2.3. Technologie sandwiches

(Composés ternaires GaAlAs) utilisant des matériaux différents sous forme de couches superposées ont permis des rendements supérieurs à 30 %, une première couche absorbe les photons d'énergie faible (Si pour le rouge et infrarouge), puis une seconde couche absorbe les photons d'énergie élevée (GaAs pour le bleu).

#### II. 3.1.2.4. Les matériaux amorphes

Dont les procédés de fabrication sont moins coûteux (dépôts en couches minces par évaporation sous vide, par pulvérisation cathodique sous vide ou par décomposition de composés gazeux du silicium) sont très prometteurs. Ils ont une efficacité moindre, variant entre 6 à 10%. Leur durée de vie est généralement inférieure à 20 ans. Le silicium amorphe dont l'effet photovoltaïque a été mis en évidence dès 1976 est, de nos jours, largement employé, malgré un rendement plus faible que le silicium monocristallin.

#### II. 3.1.2.5. Technologie semi-conductrice organique

Les semi-conducteurs organiques (Les polymères) ne sont que rarement dopés. La nature donneur ou accepteur n'est donc plus déterminée par rapport à un dopant. Elle doit être définie par rapport à l'échelle d'électronégativité du matériau considéré. Plus celui-ci est électronégatif, plus son caractère accepteur est affirmé car il a plus de pouvoir à attirer les électrons. En adoptant la convention précédente, le matériau accepteur, qui contient plus d'électrons dans son orbitale, est dit de type n et inversement celui de type p est donneur. Si deux matériaux de type opposés sont en contact, le transfert de charge du donneur vers l'accepteur ne se produit pas spontanément ; l'un d'eux doit d'abord être porté dans l'état excité, par exemple par photo absorption. Lorsque ces matériaux sont dopés, l'utilisation d'un dopant de type opposé au matériau hôte conduit à la recombinaison des charges électriques de signe opposé et donc à un faible rendement de conversion photovoltaïque. Enfin chacun de ces matériaux organiques est plus favorable soit au transport des électrons ou soit à celui des trous. Cette propriété est indépendante du type du semi-conducteur. Elle est déterminée par le recouvrement des orbitales entre les molécules. Les cellules solaires en plastique ont un rendement compris entre 4 et 5% et elles restent encore très fragiles car elles sont sensibles à l'oxygène et à l'humidité. La recherche vise à améliorer l'encapsulation et à en diminuer le prix (actuellement de l'ordre de 2 euros/watt-crête, c'est-à-dire le double de la technologie basée sur le silicium) [9].

#### II.3.1.3. L'énergie de gap

L'énergie de gap  $E_g$  (Tableau II.1) est l'un des facteurs prépondérants pour le choix du matériau. Il impose le nombre de photons du rayonnement solaire participant à la conversion et la tension de sortie de la cellule élémentaire.

Tableau II 1 . Caractéristique des matériaux photovoltaïque

Matériau	Bande de gap $E_g$ (eV)	Densité de courant Max (mA/cm <sup>2</sup> )	Rendement théorique Max (%)
Matériaux inorganiques			
Silicium (Si)	1.12	43.4	28
GaAs	1.4	31.8	30
CdTe	1.5	28.5	29
a-Si	1.65	21.7	27
Matériaux organiques			
polyéthylène	7 à 8 Ev	Conductivité : $10^{-15} \cdot \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$	

**II. 3.1.4. Panneaux photovoltaïques**

Un module (panneau) photovoltaïque, est constitué de cellules photovoltaïques connectées en série et en parallèle. Un champ photovoltaïque ou champ solaire est constitué d'un ensemble de modules connectés en série et/ou en parallèle. La caractéristique électrique d'un champ solaire dépend de la façon dont les modules sont câblés : les modules connectés en série définissent la tension d'une « branche » et donc du champ ; les branches sont ensuite connectées en parallèle déterminant l'intensité délivrée par le champ. Le choix de la caractéristique du champ solaire va dépendre du point de fonctionnement requis par les composants associés (batteries, convertisseurs, électrolyseur ...).

**II.3.1.5. Performances et caractéristiques électriques courant/tension d'un module photovoltaïque**

Les performances caractéristiques des modules photovoltaïques est dépend des matériaux dont les modules sont ils fabriquée et les conditions physiques (la position des modules, ensoleillement et une température) du travail.

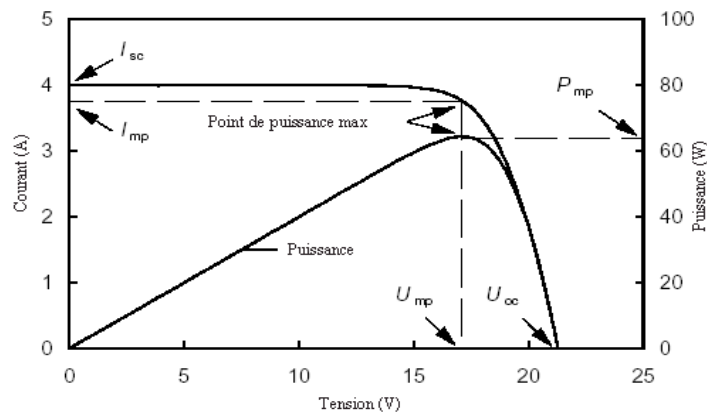


Figure II 4. Caractéristiques I-V et P-V typique d'un générateur photovoltaïque (PV)

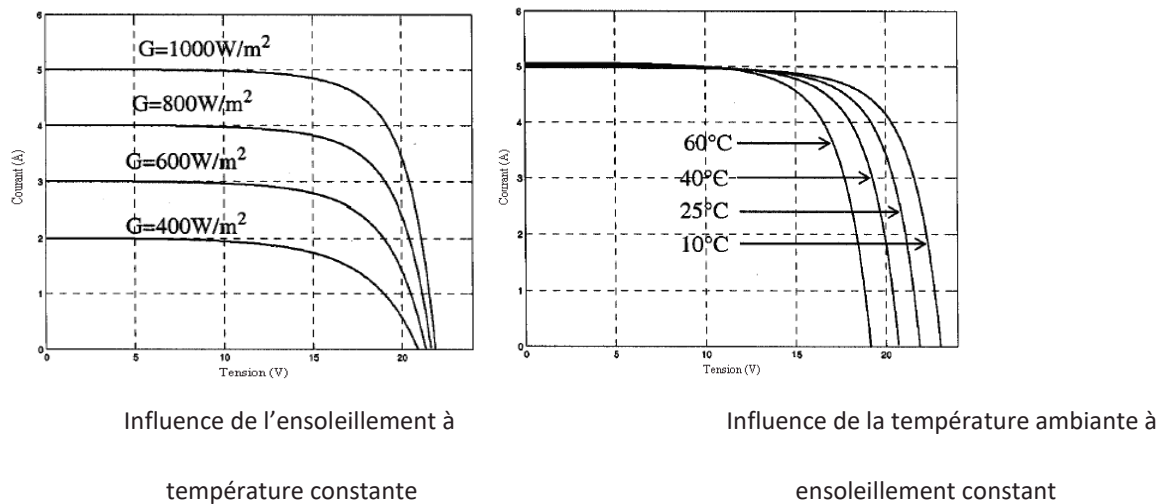
Les performances caractéristiques sont définies par:

1. Le courant de court circuit  $I_{sc}$ .

2. La puissance crête MPP (Maximum power point) aux conditions standard de test\*, c'est au point de puissance maximale définie par  $I_{mp} \times U_{mp}$  que l'on exploite au mieux la puissance crête installée (figure 7).

3. La tension de circuit ouvert  $U_{oc}$ .

La Figure 7 décrit les courbes I-U d'un générateur photovoltaïque de 85 Wc, sous différentes conditions d'ensoleillement et de température ambiante. L'augmentation de la température ambiante entraîne une diminution de la tension. L'ensoleillement a une très faible influence sur cette tension. Lorsque la puissance demandée augmente, le courant délivré augmente. La tension diminue jusqu'à un point de fonctionnement qui correspond au point de puissance maximale (MPP). Ce MPP dépend de la température ambiante mais surtout de l'ensoleillement. Le courant de court circuit varie selon l'ensoleillement et la température (figure 8). La température ambiante a une faible influence sur ce courant. L'ensoleillement est un paramètre beaucoup plus important : le courant délivré par les modules est proportionnel à l'éclairement reçu par la surface des panneaux.



**Figure II 5. Courbe caractéristiques d'un champ solaire de 85W**

Le rendement d'un champ photovoltaïque est le rapport de la puissance qu'il délivre sur la puissance solaire reçue par sa surface. Le rendement est de l'ordre de 10 % à 15%.

**II. 3.1.6. Interface des générateurs photovoltaïque**

Le générateur photovoltaïque est constitué d'un réseau série parallèle de nombreux modules photovoltaïques regroupés par panneaux photovoltaïques. Le choix de la caractéristique du champ solaire va dépendre du point de fonctionnement requis par les composants associés (batteries, convertisseurs, électrolyseur ...). Les générateurs photovoltaïques sont modulaires. Leur puissance varie de manière discrète par pas équivalent à la puissance d'une branche. Lors de la connexion en série, on protège les éléments avec des diodes by-pass (souvent intégrées au module) afin d'éviter le fonctionnement inverse des cellules occultées, entraînant une surchauffe voire une destruction des cellules. Lors de la connexion en parallèle, on place des diodes dites « séries », empêchant aussi le fonctionnement inverse. Les diodes Schottky sont généralement utilisées car les chutes de tension dans ces diodes sont seulement de 0,4 V / diode (diode classique 0,7 V). Diverses mesures de sécurité

doivent être prises telles que des parafoudres et la mise à la terre des châssis. Lors de la mise en place d'un champ solaire, il est important d'installer un interrupteur général, unique moyen de couper spontanément la production de ce générateur.

### **II.3.1.7. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque**

#### **II. 3.1.7. 1. Les avantages**

1. Une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.

2. Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du Milli Watt au MégaWatt.

3. Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.

4. La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

#### **II.3.1.7. 2. Les inconvénients**

1. La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.

2. Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.

3. Tributaire des conditions météorologiques.

4. Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.

5. Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.

6. Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur.

### **II.3.2. Piles à combustible**

#### **II.3.2.1. Historique**

Le système de la pile à combustible est basé sur le principe inverse de l'électrolyse. C'est d'ailleurs en voulant vérifier la réversibilité du phénomène de l'électrolyse de l'eau qu'un chercheur anglais Sir William Grove découvrit en 1839 le principe d'une machine que d'autres chercheurs appelèrent par la suite "pile à combustible".

Vers 1935, un autre anglais, F.T. Bacon, reprit l'étude des piles à combustible. Ses travaux aboutirent en 1953 au premier prototype de 1 kW qui servit de modèle à la pile hydrogène - oxygène des missions spatiales Apollo. Depuis 1970, la recherche tend vers une application terrestre de la pile à combustible. Le but est d'adapter des piles, à l'origine destinées à de courtes missions spatiales (une dizaine de jours), à des utilisations de très longues durées en tant que génératrices de courant électrique et de chaleur tout en répondant à des exigences économiques habituelles de rentabilité. A partir des années 1990, la problématique de maîtrise des émissions de gaz à effet de serre ainsi que le problème des ressources énergétiques relancent les piles.

### II.3.2.2. Principe de fonctionnement

Une pile à combustible est un assemblage (Figure 9) de cellules élémentaires, en nombre suffisant pour assurer la production électrochimique d'électricité dans les conditions de tension et de courant voulues.

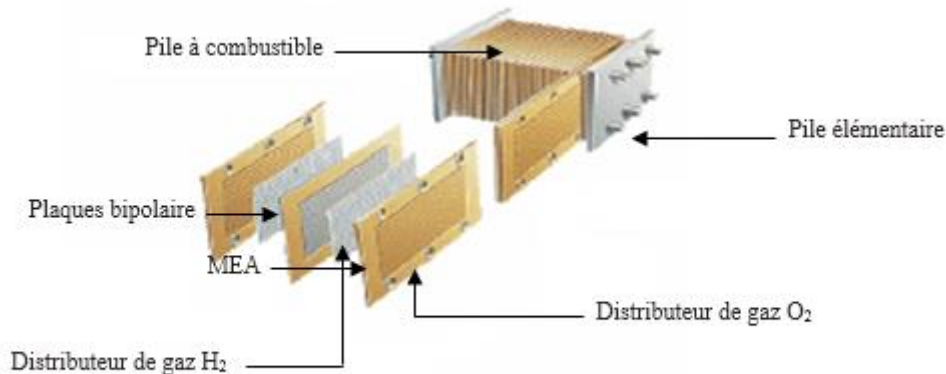


Figure II 6 . Assemblage d'une pile à combustible PEMFC.

#### Plaques bipolaires

Ce sont les plaques de graphite ou d'un métal résistant aux corrosions acide de la membrane et oxydante du milieu réactionnel, qui sont en contact avec la surface des électrodes et qui permettent sur toute la surface de l'électrode :

1. la distribution des gaz .
2. la collecte des électrons .
3. l'évacuation des produits formés (l'eau à l'anode).

**MEA** : (Assemblage Membrane-Électrode) est composé d'une anode, PEM (membrane échangeur de proton) et une cathode.

### II.3.2.3. La pile élémentaire

Chaque cellule est constituée de deux compartiments disjoints alimentés chacun par les gaz réactifs. Les deux électrodes, séparées par l'électrolyte, complètent le dispositif. De façon générale, le fonctionnement électrochimique d'une cellule unitaire de pile à combustible peut se schématiser sous la forme donnée dans la figure 10

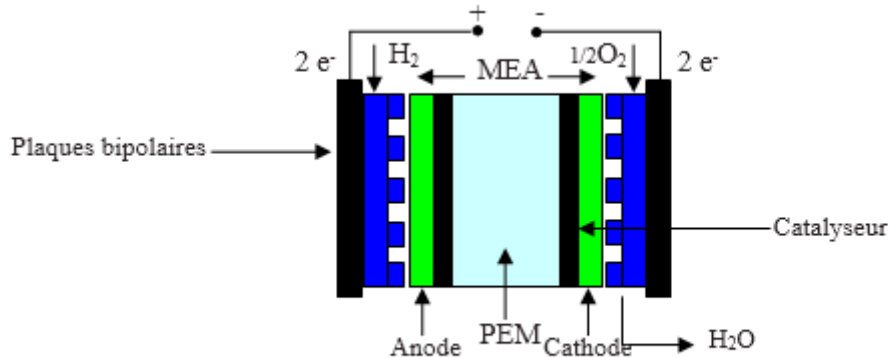


Figure II 7 . Cellule d'une pile a combustible PEM (le polymère NAFION®)

Les piles fonctionnant à basse température possèdent dans leurs structures polymérisées des groupements acides échangeurs de protons (d'où leur nom de Proton Exchange Membrane : PEM), généralement  $\text{SO}_3\text{H}$  ou  $\text{COOH}$ , permettant le transfert des protons de l'anode vers la cathode. Il n'existe pas, à l'heure actuelle, de membrane de type basique, permettant le transfert d'ions  $\text{OH}^-$  de la cathode vers l'anode, qui soit suffisamment stable chimiquement en milieu  $\text{H}_2/\text{O}_2$ . Comme tout électrolyte de pile à combustible, celui-ci doit présenter une très faible perméabilité aux gaz et un caractère isolant électronique. L'épaisseur de la membrane polymère échangeuse d'ions, généralement comprise entre 50 et 150  $\mu\text{m}$  [1], résulte d'un compromis entre ces divers paramètres : les caractéristiques mécaniques, la conductivité ionique, la perméabilité des gaz, les caractéristiques d'hydratation et le coût de fabrication.

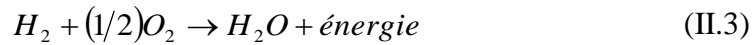
L'oxydation électrochimique de l'hydrogène est réalisée à une anode d'un matériau catalytique conducteur, constituant le pôle négatif de la pile :



Parallèlement la réduction électrochimique de l'oxygène se produit à une cathode catalytique (contenant également du platine dispersé), constituant le pôle positif de la pile:



Les réactions (3) et (4), qui mettent en jeu un transfert de charge (électrons) à l'interface électrode/électrolyte, s'appellent réactions électrochimiques



Les électrons sont collectés par l'anode et rejoignent la cathode au travers de la charge.

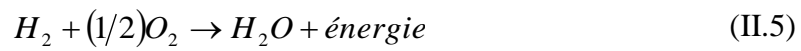
#### II.3.2.4. Énergies mises en jeu

Un élément de pile à combustible réalise la transformation directe de l'énergie chimique d'une réaction (en fait l'enthalpie libre de réaction  $\Delta G$ ) en énergie électrique selon l'équation (équilibre électrochimique):

$$\Delta G + nFE_{eq} = 0 \quad \text{où} \quad \Delta G < 0 \quad (\text{II.4})$$

Avec  $E_{eq}$  f.é.m. (force électromotrice) de la pile à l'équilibre (c'est à-dire à intensité de courant  $I$  nulle),  $n$  nombre d'électrons échangés dans les réactions électrochimiques élémentaires (réactions de demi-pile),  $F = 96500 \text{ C} = 1 \text{ faraday}$ , c'est-à-dire la quantité d'électricité associée à une mole d'électrons.

Dans le cas de la pile hydrogène/oxygène, la réaction chimique globale, associée à cette transformation, est la combustion de l'hydrogène dans l'oxygène :



Avec  $\Delta G^0 = -237 \text{ kJ/molH}_2$  (état standard)

Cela correspond à une f.é.m. à l'équilibre à  $25^\circ \text{C}$  (état standard) :

$$E_{eq}^0 = -\frac{\Delta G^0}{nF} = \frac{273 \times 10^3}{2 \times 96500} = 1.229 \approx 1.23 \text{ V} \quad (\text{II.6})$$

#### II.3.2.5. Différentes filières technologiques de piles à combustible

Différentes familles de piles à combustible ont été développées, sont habituellement classées selon la nature de l'électrolyte, la température de fonctionnement, les gaz consommés. La figure II.2 décrit les six grandes catégories et la figure II.3 montre. Caractéristiques techniques des piles à combustible.

Tableau II 2 . Les catégories des piles à combustible [3]

Type	Appellation	Niveau d'avancement (Puissance électrique)	Industrialisation
<b>SOFC</b>	Pile à combustible à oxyde solide (Solid Oxide Fuel Cell)	prototype (100 kW)	2006
<b>MCFC</b>	Pile à combustible à carbonate fondu ( Molten Carbonate Fuel Cell)	prototype (2 MW)	2008
<b>PAFC</b>	Pile à combustible à acide phosphorique (Phosphoric Acid Fuel Cell)	série précommerciale (200 kW)	–
<b>PEMFC</b>	Pile à combustible à membrane (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)	prototype (250 kW)	2002
<b>DMFC</b>	Piles à combustible au méthanol direct (Direct Methanol Fuel Cell)	Recherché et développement	2015
<b>AFC</b>	Pile à combustible alcaline (Alkaline Fuel Cell)	prototype (10 kW) et production unitaire	2002

Tableau II 3 . Caractéristiques techniques des piles à combustible [1]&[3]

	Type de pile à combustible					
	AFC	PEMFC	PAFC	SOFC	MCFC	DMFC
Carburant	Hydrogène, gaz naturel, méthanol, bio gaz.....					
Comburant	Oxygène (généralement de l'air)					
Électrolyte	Solution KOH	Membrane à échange de protons (Nafion)	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	Oxyde de zircon stabilisé ZrO <sub>2</sub> et yttrium Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mélange de Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> et de KCO <sub>3</sub> fondu dans une matrice LiAlO <sub>2</sub>	Membrane à échange de protons
Type de charge Transférée	OH <sup>-</sup>	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	O <sup>2-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	H <sup>+</sup>
Électrode	Pt,Ag	Pt	Pt	Ni, céramique	Ni	
Température	<100°	80° à 90°	200°	700° à 1000°	650°	60° à 120°
Puissance	100 mW/cm <sup>2</sup>	350 mW/cm <sup>2</sup>	300 mW/cm <sup>2</sup>	500 mW/cm <sup>2</sup>	300 mW/cm <sup>2</sup>	300 mW/cm <sup>2</sup>

### II.3.2.6. Les avantages et inconvénients de la pile à combustible

Les piles à combustible présentent de nombreux avantages par rapport aux installations conventionnelles de production d'électricité.

#### II.3.2.6.1 Les avantages

##### 1) Le rendement

Le rendement de la pile serait bien meilleur que celui d'un moteur thermique. Car la différence notable avec un moteur à combustion interne, c'est que le rendement énergétique de la pile ne dépend pas du théorème de Carnot qui veut qu'il soit fonction du rapport de température entre deux sources de chaleur, l'une chaude et l'autre froide. Dans une pile à combustible, l'énergie est directement récupérée sous forme d'énergie électrique. Ce qui fait que le rendement énergétique se réduit au rapport de cette énergie sur l'énergie chimique de

combustion. Et donc théoriquement, il pourrait atteindre 100 %. En pratique, dans une pile à combustible le rendement net de la conversion en électricité de l'énergie apportée par un combustible est habituellement annoncé à des valeurs de 40 à 70 %.

## 2) Respect de l'environnement

Dans les domaines de la pollution et du bruit, les piles à combustible sont les mieux placées. Dans une pile, la réaction chimique entre combustible et comburant s'effectue à des températures beaucoup plus basses que dans les convertisseurs d'énergie classiques, moteurs à combustion interne ou turbines par exemple. Cette baisse de température a comme avantage d'éviter l'activation de l'azote de l'air et sa transformation partielle en oxydes polluants (NOx). L'hydrogène permet l'obtention de densités de courant élevées avec relativement peu de polarisation des électrodes. C'est un élément très répandu dans la nature, non toxique et qui n'engendre aucun sous-produit polluant lors de son utilisation. Donc, pour ce qui est des émissions de polluants, il n'y a pratiquement pas de production d'oxydes d'azote et, si le combustible utilisé est de l'hydrogène pur, les rejets sont effectivement quasiment nuls. Pour les piles comportant un générateur d'hydrogène incorporé, les émissions peuvent également rester très faibles. Quant au bruit, un cœur de pile n'en émet pas et seuls quelques accessoires peuvent en produire. Leur niveau est en général très faible.

## 3) Modularité

Dans la pratique, un grand nombre de piles élémentaires sont associées pour obtenir la puissance nécessaire. Les raccordements électriques s'effectuent en parallèle ou en série pour l'ajustement de la tension et de l'intensité en fonction des besoins.

La capacité énergétique d'une pile à combustible dépend donc de la surface et du nombre de cellules élémentaires qui la constitue. Ainsi, selon le nombre de cellules élémentaires, une pile peut fournir de quelques kW à plusieurs MW.

### II.3.2.6.2. Les inconvénients

#### 1) Coût

Il s'agit d'un des points sensibles, commun à tous les types de piles à combustibles. Il est d'une importance particulière pour tous les développements destinés au grand public. Dans le domaine des transports, le coût actuel des piles est d'au moins un facteur 100 supérieur à ce qui serait économiquement viable.

Dans le cas des piles à membranes (PEMFC), trois causes sont couramment annoncées comme responsables de ce prix trop élevé.

Les membranes

Le platine

Les plaques d'interconnexion

Pour la pile elle-même, on considère que le tiers du prix correspond au cœur de la pile (blocs) et les 2/3 restants aux accessoires (pompes, compresseurs, échangeurs, turbines de détente des effluents, etc.). L'acceptabilité de ce surcoût dépendra de la durabilité finale que les piles seront capables d'atteindre et, bien entendu, de la prise en compte de l'ensemble des autres contraintes (environnementales notamment).

## 2) Pollution

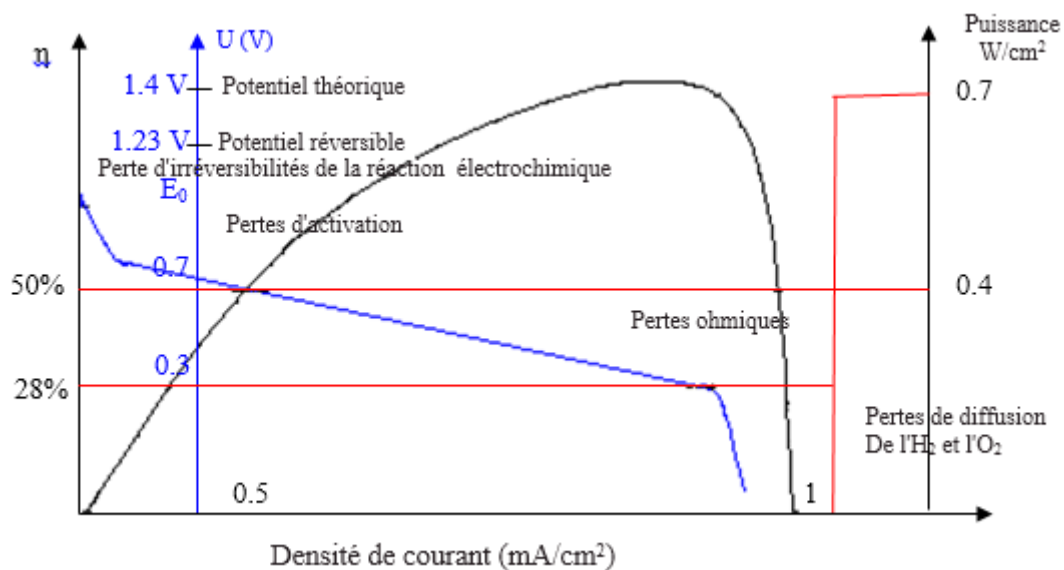
Une pile fonctionnant uniquement à l'hydrogène ne produit aucun polluant. Par contre les piles à combustibles utilisant de l'éthanol ou méthanol rejettent ces gaz "CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO" (en très faible quantité) qui sont dangereux pour l'atmosphère. Pour info, une voiture à essence rejette en plus du SO<sub>2</sub>.

## 3) Durabilité

A l'inverse de ce qui a été dit ci-dessus pour le poids et le volume, les piles actuelles ont des caractéristiques qui conviennent pour les applications dans le domaine des transports mais qui restent à prouver pour les installations fixes. Dans le premier cas, une durée de vie de quelques milliers d'heures est en effet suffisante alors que dans le second, il faut un ordre de grandeur en plus. Pour amortir l'investissement nécessaire, des durées de vie d'au moins 40000 à 50000 heures sont en effet nécessaires. Or certaines piles en démonstration ont déjà passé le cap de ces 40000 heures, notamment en ce qui concerne les PAFC.

### II.3.2.7. Performance et caractéristiques électriques et paramètres

La caractéristique électrique d'une pile à combustible est déterminée par le nombre de cellules en série, définissant la tension totale et par la taille de la surface active, déterminant le courant délivré.



**Figure II 8 . Caractéristique électrique d'une cellule de pile à combustible basse température**

Les densités de courant que l'on peut obtenir (en A/m<sup>2</sup>) varient en fonction du type de pile, de sa température de fonctionnement, de la densité de catalyseur, de la stœchiométrie de l'alimentation en gaz réactifs. On limite généralement la tension à 0,4-0,5 V, tension du point de puissance maximale.

Le potentiel thermodynamique théorique est donc de 1,23 V. Cependant, la tension en circuit ouvert ( $I = 0$ ) varie en réalité entre 0,9 et 1,1 V. Cette première réduction est liée aux irréversibilités des réactions électrochimiques, notamment de la réduction de l'oxygène à la

cathode. De plus, pour les faibles densités de courant, des contre réactions sur les électrodes, dont l'importance est liée à leur cinétique, génèrent des surtensions d'activation.

Ensuite, pour la partie linéaire de la courbe, ce sont les pertes liées aux résistances électroniques et ioniques internes qui diminuent la tension entre électrodes.

Enfin, pour les hautes densités de courant, c'est la cinétique de diffusion des gaz à travers les électrodes qui devient le facteur limitant. Ce phénomène est d'autant plus précoce si l'on utilise de l'air à la place d'oxygène pur (les 80 % d'azote passif gêne l'accès des sites réactifs aux 20 % d'oxygène actif). A partir d'une certaine quantité de courant demandée, l'alimentation en molécules d'oxygène ne peut plus suivre, et la tension chute rapidement. L'influence des différents paramètres est décrite plus loin.

### II.3.2.8. Rendement du système

Le rendement énergétique d'une cellule, appelé aussi rendement potentiel, dépend de la tension de fonctionnement. Il est égal au rapport de l'énergie délivrée sur l'énergie globale mise en jeu. L'énergie globale mise en jeu au cours de la réaction est l'enthalpie, égale à 286 kJ/mol dans les conditions standards<sup>2</sup>. Cette énergie correspond à un potentiel, appelé thermo neutre, égal à 1,48 V. Le rendement énergétique s'obtient simplement en divisant la tension de la cellule par le potentiel thermo neutre (Équation II.7).

$$\eta_{FC} = \frac{U}{U_{th}} \quad (\text{II.7})$$

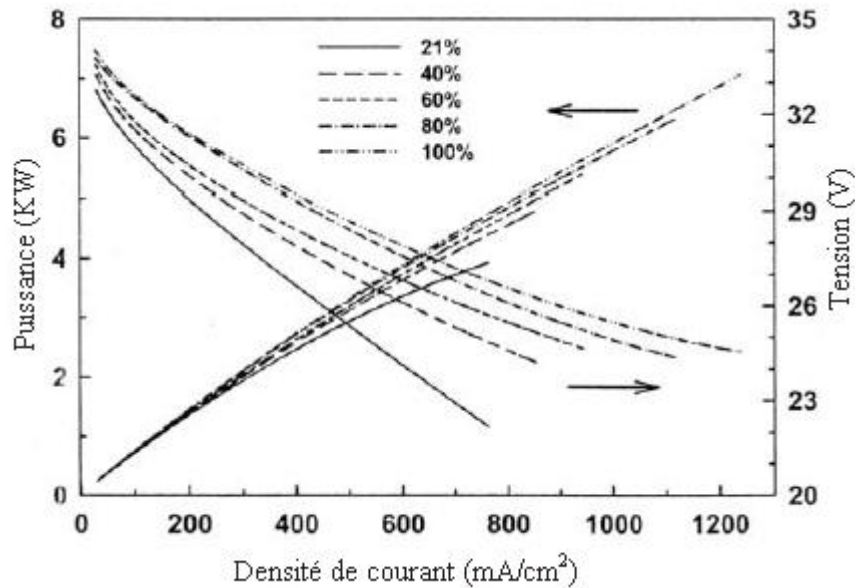
Avec  $U$  tension de la cellule (V).

$U_{th}$  potentiel Thermo neutre (V).

Le rendement énergétique varie donc entre 65 % lorsque la densité de courant est nulle et 34 % si on limite la tension à 0,5 V.

Ce rendement énergétique est souvent calculé par rapport à l'enthalpie libre de la réaction de formation de l'eau (241 kJ/mol), correspondant au potentiel d'équilibre (1,23 V). On distingue ces deux rendements en indiquant s'il est basé sur le pouvoir calorifique inférieur de l'hydrogène (PCI), c'est-à-dire par rapport au potentiel d'équilibre ou sur le pouvoir calorifique supérieur (PCS) dans notre approche [1].

Le rendement énergétique d'une pile à combustible est amélioré par l'augmentation de la température des cellules et des pressions partielles en hydrogène et oxygène. La pression partielle de l'oxygène est obtenue en multipliant son taux de concentration par la pression totale de la pile. L'influence de la pression partielle en oxygène est décrite à la figure 11 On observe que, pour une intensité donnée, l'augmentation du pourcentage d'oxygène dans l'air fourni à la cathode, entraîne une augmentation de la tension : la puissance délivrée par les cellules est donc plus importante.



**Figure II 9 . Courbes U-I et P-I d'une pile PEM (35 cellules de 232 cm<sup>2</sup>) en fonction de la concentration d'oxygène (P= 3,43 bar) [1].**

Le nombre de cellules nécessaires pour fournir une puissance donnée peut être diminué par une alimentation en oxygène de la pile. L'influence de la température est comparable à celle de la pression partielle en oxygène. Par contre, la pression partielle en hydrogène a une influence négligeable si le taux d'hydrogène est supérieur à 20 % [1].

Le rendement du système est égal au produit du rendement de la pile à combustible et du rendement des différents systèmes nécessaires à son alimentation.

On obtient le rendement global des cellules électrochimiques, ou rendement de puissance, en multipliant le rendement faradique et le rendement énergétique.

### II.3.2.9. Périphérique

Pour le fonctionnement la pile PEM, comme toute pile à combustible, différents systèmes nécessaires à son fonctionnement : approvisionnement, refroidissement, contrôle et régulation. Le circuit des gaz est contrôlé en débit et pression. Dans ce paragraphe, nous représentons un exemple de contrôle qui nous permet de comprendre au mieux les différentes phases de fonctionnement de la pile à combustible.

Les principales options sont :

Alimentation de la cathode en mode ouvert par de l'air parfois enrichi en oxygène. Un ventilateur ou compresseur amène le gaz au débit nécessaire à une stœchiométrie de 1,5 à 2. Le facteur stœchiométrique correspond au rapport entre le débit fourni à la pile et le débit réellement consommé. Le gaz non consommé est évacué en sortie. Un déverseur maintient la pression de fonctionnement dans le système.

Alimentation de l'anode en mode ouvert, fermé ou avec recirculation du gaz non consommé. L'hydrogène comprimé est détendu à la pression de fonctionnement de la pile puis humidifié. En mode ouvert, la stœchiométrie est généralement de 1,5.

L'évacuation de l'eau produite est indispensable. Dans le cas des piles alcalines, l'eau entraîne la dilution de l'électrolyte et donc la diminution de sa conductivité. Dans le cas de piles à membrane, l'eau obstrue les canaux de circulation des gaz. On utilise de simples séparateurs gaz/liquide pour les technologies à membrane. Le système se complique pour la pile alcaline (évaporateur, condenseur...).

Circuit de refroidissement (pompe).

Circuit d'humidification des gaz et de la membrane (pompe et système de chauffage).

Contrôle de la tension des cellules, témoin de l'endommagement d'une membrane.

Contrôle température, pression...

Les termes en gras correspondent à des composants très consommateurs d'énergie. Le rendement global d'une pile à combustible doit prendre en compte la consommation intrinsèque de son périphérique (Équation II.8).

$$\eta_{globale} = \frac{P_{FC} - P_{CI}}{P_{GAZ}} \quad (II.8)$$

Avec  $\eta_{global}$  rendement global ou rendement de puissance de la pile (%).

$P_{FC}$  puissance délivrée par la pile à combustible (W).

$P_{CI}$  puissance consommée par le périphérique (W).

$P_{GAZ}$  puissance consommée sous forme de gaz (W).

### II.3.2.10. Les différentes utilisations

#### 1) Le mobile

Les moyens de transport jouent un rôle essentiel dans la promotion de l'hydrogène auprès des industriels et des politiques. L'utilisation des PAC est avantageuse sur plusieurs plans : il n'y a que de l'eau émise par le pot d'échappement, le véhicule est moins bruyant et le rendement est plus efficace que les moteurs à explosion.

#### 2) Le Stationnaire

Les applications stationnaires sont les plus diversifiées parmi les applications des piles : cela tient à plusieurs choses:

Un large spectre de puissance du kW à plusieurs MW ;

Des applications allant de l'approvisionnement d'électricité à la cogénération en passant par la génération de vapeur ou de froid ;

Divers types de piles possibles.

On peut distinguer la production décentralisée - avec en particulier les applications stationnaires de faible puissance (résidentiel, secours...) ainsi que la cogénération de moyenne puissance (quelques centaines de kW) - et la production centralisée d'électricité sans valorisation de la chaleur.

### **2.1) La production décentralisée**

Des piles de faible puissance peuvent être placées dans des habitations, sites isolés, bâtiments administratifs... Ces applications stationnaires mettant en jeu soient un apport exclusif d'électricité (systèmes de secours ou de sécurité), soit de la cogénération (production simultanée d'électricité et de chaleur), sont l'une des possibilités qui pourrait le plus vite déboucher sur le marché.

### **2.2) La production centralisée**

Parmi les types de production d'électricité, on peut trouver pour les piles différentes types d'application : les applications de secours, la production d'appoint reliée ou non au réseau ou une production centralisée d'électricité. Les piles à combustible dépassent rarement la taille d'1 MW, cependant des études sont faites sur des centrales de plusieurs centaines de MW. Celles-ci pourraient ainsi remplacer les centrales thermiques trop polluantes.

## **3) Le portable**

Les piles à combustible peuvent être de toutes les tailles grâce à leur modularité : de moins d'1 Watt à plusieurs MW, ce qui permet la création de piles de très petite taille ne comportant que quelques cellules et ayant une petite surface. Les piles de petite taille ont en effet de réelles chances dans un marché d'appareils électroniques en constante croissance : téléphones portables, ordinateurs, agendas électroniques. D'où l'intérêt des industriels pour les piles d'une puissance entre 0.1 et 10 Watts.

### **II.3.3. Électrolyseurs**

Un électrolyseur est l'appareil inverse de la pile à combustible. Il décompose l'eau en Hydrogène et oxygène lorsqu'il est électriquement alimenté.

#### **II.3.3.1. Différentes technologies**

Il existe trois technologies d'électrolyseurs schématisées

#### **II.3.3.2. La technologie à membrane, équivalente aux PEMFC**

Un des types les plus prometteurs d'électrolyseur acides est un électrolyseur de la membrane d'échange de proton (polymère) (PEM), qui ressemble à cela de la cellule de pile à combustible de PEM décrite dans la section de la pile à combustible.

##### **II.3.3.2.1. La technologie alcaline**

L'électrolyte utilisé est hydroxyde aqueux de potassium (KOH) la plupart du temps avec des solutions de 20-30 %. Cette gamme de concentration donne la conductivité optimale et la résistance à la corrosion de l'acier inoxydable.

Les températures de fonctionnement et les pressions typiques de cet électrolyseur sont 70-100° C et 1-30bar respectivement. Physiquement un électrolyseur se compose de plusieurs

cellules électrolytiques, reliées en parallèle. Deux conceptions distinctes de cellules existent : mono-polaire et bipolaire. En cellules mono-polaires les électrodes sont négatives ou positif tandis que les cellules bipolaires ont des électrodes qui sont négatives sur un côté et positif de l'autre côté séparé par un isolateur électrique, comme montré dans figure 2.10 [1]. Les piles bipolaires d'électrolyseur sont plus compactes que les mono-polaires. L'électrolyseur bipolaire fonctionne à des pressions plus élevées (1 barre jusqu'à 30), et c'est un autre avantage, parce qu'il réduit le travail de compression exigé pour stocker l'hydrogène produit par l'électrolyseur.

Les systèmes Mono-polaires fonctionnent à la pression atmosphérique. L'avantage réside est de la conception compacte bipolaire de cellules mène à des chemins courants plus courts dans les fils électriques et les électrodes comparées à la cellule mono-polaire conçoivent. Ceci réduit les pertes dues à la résistance ohmique interne de l'électrolyte, et augmente donc l'efficacité d'électrolyseur. Cependant, il y a quelques inconvénients des cellules bipolaires, par exemple un échec unicellulaire mène au défaut de fonctionnement de la pile de totalité. Des cellules Mono-polaires peuvent être reliées individuellement dans la pile selon les demandes courant-tension, une cellule peut être débranchées dans le cas de l'échec sans exécution sérieusement inquiétante. En outre, la compacité et les hautes pressions des l'électrolyseurs bipolaires exigent la conception de système relativement sophistiqué et complexe. Néanmoins, la plupart des électrolyseurs alcalins aujourd'hui sont bipolaires.

Actuellement les électrolyseurs alcalins « améliorés », utilisant entre autre, une nouvelle géométrie des cellules appelée « zéro-gap », ont des performances comparables aux électrolyseurs conventionnels et à membrane. Les performances de cette technologie se sont beaucoup améliorées par :

1. Changement de la géométrie et de la configuration des cellules (plaques bipolaires, appelées « zéro gap ») permettant une diminution des pertes ohmiques et une augmentation de la densité volumique de puissance,
2. Augmentation de la température entraînant une augmentation de la conductivité de l'électrolyte et une diminution des surtensions aux électrodes,
3. Développement de nouveaux catalyseurs diminuant aussi les surtensions,
4. Augmentation de la pression permettant d'augmenter la conductivité de l'électrolyte.

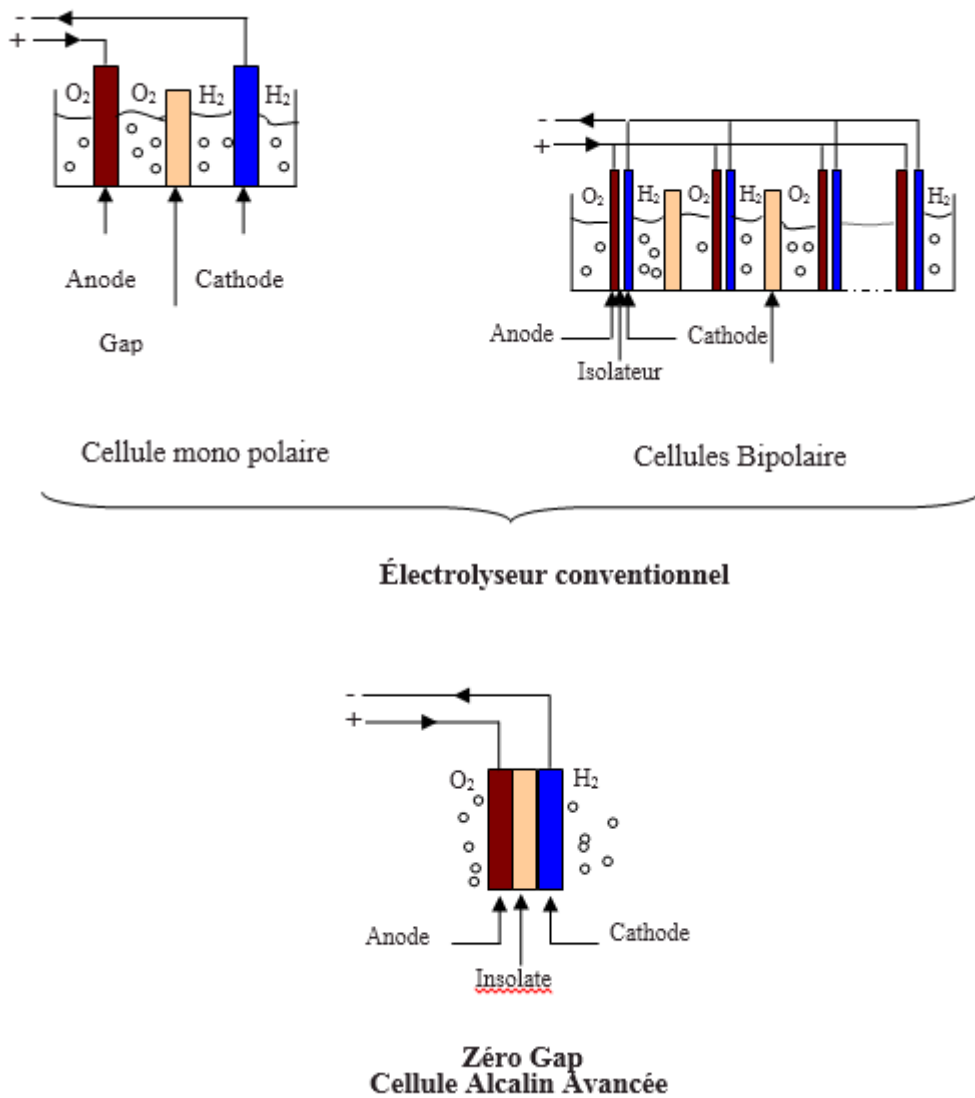


Figure II 10 . Schémas de principe de l'électrolyseur Alcalin

### II.3.3.2.2. La technologie à vapeur d'eau à haute température, équivalente aux SOFC

Les électrolyseurs haute température ont une tension par cellule plus basse que les autres technologies (l'énergie de dissociation de la vapeur d'eau est plus faible que celle de l'eau) mais la densité de courant maximale atteinte est faible (figure 13). De plus, le développement de cette technologie rencontre des problèmes de matériaux et de fabrication. Il n'existe que des prototypes.

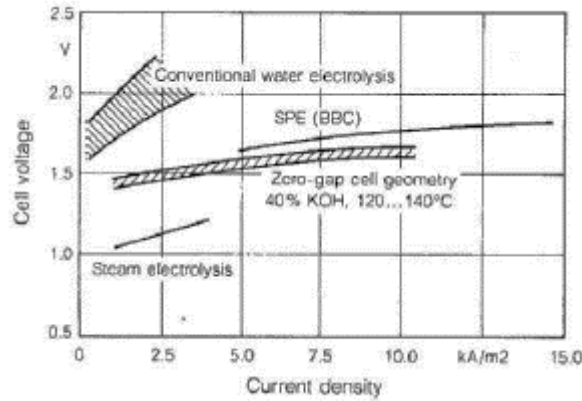


Figure II 11 . Compare les caractéristiques électriques des trois technologies [1]

II.3.3.3. Caractéristiques électriques et paramètres

La caractéristique électrique d’un électrolyseur est déterminée par sa technologie, le nombre de cellules en série (tension) et par la taille de la surface active (courant). La figure 14 montre les caractéristiques électriques d’une cellule d’électrolyse de technologie alcaline améliorée. La tension à vide est d’environ 1,23 V, tension d’équilibre. Lorsque l’intensité augmente, les pertes augmentent : la tension augmente. La tension d’une cellule est généralement limitée à 2 V [2].

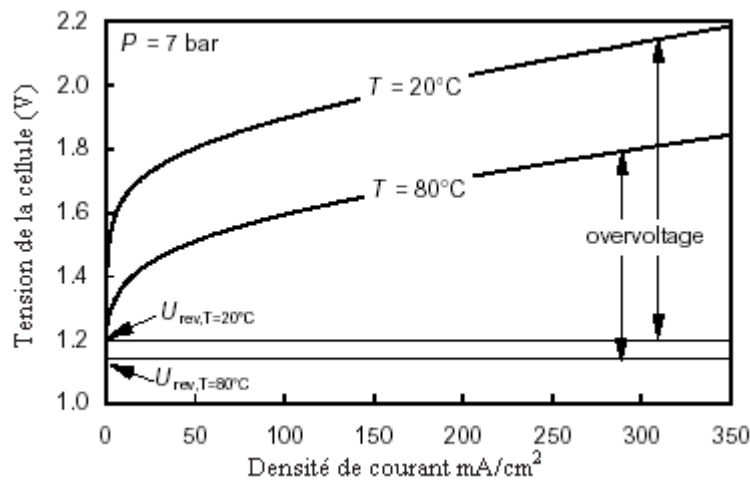


Figure II 12 . Caractéristique électrique tension-courant d’un électrolyseur alcalin [2]

Le rendement énergétique ou rendement potentiel des cellules d’un électrolyseur est le rapport de l’énergie globale mise en jeu sur l’énergie consommée. Il se calcule simplement en divisant le potentiel thermo neutre par la tension de la cellule (Équation II.9).

$$\eta_{ELE} = \frac{U_{th}}{U} \quad (II.9)$$

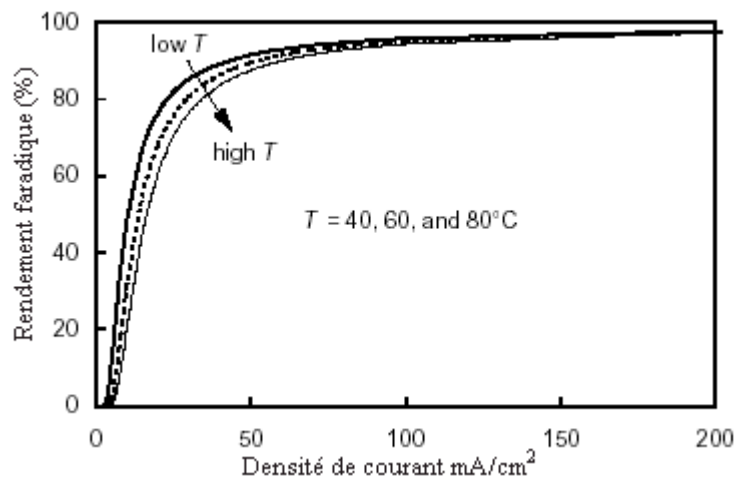
Avec  $U$  tension de la cellule (V)

$U_{th}$  potentiel Thermo neutre (V)

Le rendement énergétique d'une cellule d'électrolyse diminue lorsque le courant augmente. Il est supérieur à 74 % lorsque la tension est limitée à 2 V (cas des électrolyseurs alcalins améliorés). On obtient le rendement global ou rendement de puissance des cellules de l'électrolyseur en multipliant le rendement énergétique et le rendement faradique.

Un autre critère de performance est essentiel pour les électrolyseurs. En effet, les gaz qui traversent la membrane sans se recombiner, rendent les gaz produits impurs et surtout dangereux. La limite inférieure d'explosivité de l' $H_2$  dans l' $O_2$  et de l' $O_2$  dans l' $H_2$  est de 4%. Deux paramètres modifient les performances des électrolyseurs, c'est-à-dire le rendement énergétique, le rendement faradique ainsi que la pureté des gaz produits par l'électrolyseur.

La température augmente la conductivité de l'électrolyte. Cela diminue les surtensions aux électrodes. La tension des cellules étant diminuée, le rendement potentiel est amélioré. Par contre, l'augmentation de la température diminue le rendement faradique d'un électrolyseur alcalin et la pureté des gaz (figure 15).



**Figure II 13. Influence de la température sur le rendement faradique d'un électrolyseur alcalin. [2]**

Les expériences montrent que le rendement énergétique dépend de l'intensité consommée par l'électrolyseur mais pas de la pression de fonctionnement. La pression n'influence pas les performances car l'augmentation de la tension à vide est compensée par l'augmentation de la conductivité de l'électrolyte. Par contre, la pureté des gaz dépend à la fois de l'intensité et de la pression. A faible intensité, le débit de gaz produit est faible tandis que le débit traversant la membrane est constant quelle que soit l'intensité. Le gaz produit est donc moins pur lorsque l'intensité est faible [1].

### II.3.3.4. Périphérique

Pour le fonctionnement de l'électrolyseur, différents systèmes nécessaires à son fonctionnement : approvisionnement, séparations des gaz, refroidissement, contrôle et régulation. la gestion des flux et des pressions ainsi que l'évacuation des gaz.

La consommation des périphériques, souvent très importante, doit être prise en compte dans le calcul du rendement global des électrolyseurs.

$$\eta_{globale} = \frac{P_{gaz}}{P_{EL} + P_{CI}} \quad (II.10)$$

Avec  $\eta_{global}$  rendement global ou rendement de puissance de l'électrolyseur (%)

PFC puissance consommée par les cellules (W)

PCI puissance consommée par le périphérique (W)

PGAZ puissance produite sous forme de gaz (W)

### II.3.3.5. Applications et commercialisation

Les électrolyseurs alcalins sont utilisés pour la production de gaz sur site. Ce sont généralement de grosses unités (30 kW jusqu'à 700 kW). Actuellement, les applications se sont diversifiées (production de gaz dans les laboratoires et les hôpitaux). Les modules sont plus petits mais il existe très peu d'unités de puissance inférieure à 5 kW. Les prix des petites unités (~ 3 kW) sont élevés : - 30 000 € / kW pour un électrolyseur à membrane Hogen 20 (environ 3 kW) de Diamond Lite (rendement global de 21 %) et - 15 000 € / kW pour un électrolyseur alcalin de Hydrogen Systems, sans modification du périphérique adapté à un module de 30 kW (rendement global de l'ordre de 40 %). Le prix très élevé des petites unités d'électrolyse provient du prix des cellules, du périphérique et du mode de fabrication (à l'unité).

Les fournisseurs des électrolyseurs alcalins annoncent une durée de vie de 15 à 20 ans et certains garantissent 25 ans (Hydrogen Systems). Pour un électrolyseur PEM produisant du gaz à 200 bar, la durée de fonctionnement serait très importante (150 000 heures [1]).

## II.4. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les principaux composants afin de définir les caractéristiques électriques, les rendements, l'influence des différents paramètres et les périphériques nécessaires à un fonctionnement sécurisé.

En termes de disponibilité, il apparaît qu'en dehors, des panneaux photovoltaïques, les piles à combustible et les électrolyseurs ne sont pas disponibles dans une large gamme de puissance et d'application.



# **Chapitre III**

**Modélisation Du Système Hybride  
PV-EL-PAC**



### III.1. Introduction

Dans cette partie, nous décrivons les modèles choisis compatibles au système décrit précédemment au chapitre II afin de définir leurs caractéristiques.

### III.2. Les modèles des composants

Bien qu'il existe deux concepts de modélisation, physique et électrique. La seconde approche de modélisation est de simplifier le problème en modélisant non les phénomènes physiques, mais les courbes caractéristiques par des équations paramétrées. Cette deuxième approche est performante et moins exigeante dans les données et spécifications des appareils modélisés. Le modèle physique aboutit souvent à des équations très complexes demandant une connaissance très précise des systèmes étudiés. En réalité il existe deux types de modèle, théoriques et empiriques. Les modèles empiriques sont donc préférés aux modèles théoriques dans la mesure où ils permettent une simplification du problème et une diminution du nombre de paramètres. Nous présentons dans ce paragraphe, les modèles sélectionnés pour notre outil de simulation.

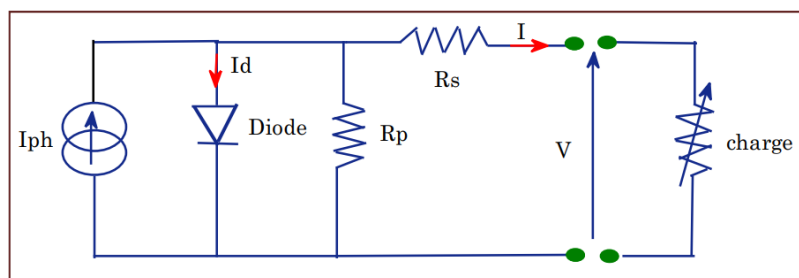
#### III.2.1. Les panneaux photovoltaïques [6]

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

#### III.2.2. Modélisation d'un panneau photovoltaïque

Afin d'étudier le fonctionnement d'un panneau photovoltaïque, son élément de base « la cellule photovoltaïque » peut être modélisé sur la base d'un circuit électrique. Actuellement, différents modèles de circuits électriques peuvent être utilisés pour la modélisation de la cellule PV en fonction du nombre de diodes (une diode, deux diodes...)[8].

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



**Figure III 01 : circuit équivalent à une diode d'une cellule PV**

Dans le circuit équivalent à une diode, figure.16, la cellule photovoltaïque est représentée par une source de courant associée à une résistance en série, une autre en parallèle et une diode.

Les deux résistances, série  $R_s$  et parallèle (shunt)  $R_p$  tiennent compte des phénomènes dissipatifs au niveau de la cellule. La résistance série est due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts face avant et arrière. La résistance parallèle

rend compte des effets, tels que le courant de fuite par les bords de la cellule, elle est réduite du fait de la pénétration des impuretés métalliques dans la jonction [12].

L'équation après plusieurs simplifications, reliant le courant délivré par un module PV constitué par la mise en série de Ns cellules et la tension à ses bornes est donnée par [12][8] :

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

$$\text{Où : } I_{ph}, I_0 \text{ et } V = N \cdot \frac{n \cdot k \cdot T}{q}$$

désignent respectivement le photo-courant, le courant de Saturation inverse de la diode et la tension thermique, avec : n le facteur d'idéalité de la diode, q la charge de l'électron, k la constante de Boltzmann, T la température de la cellule qui varie en fonction de l'éclairement et de la température ambiante (Ta), selon la relation linéaire :

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

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

Le photo courant I<sub>ph</sub> varie selon la variation de la température et l'éclairement (G)

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

Le coefficient de variation du courant en fonction de la température. I<sub>ph</sub>, Est le photo-courant dans les conditions standard (à T=25 C et G=1000 w/m2), il est en relation linéaire en avec le courant de court-circuit I<sub>cc</sub> et des résistances série R<sub>s</sub> et parallèle R<sub>p</sub>.

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

Concernant le courant de saturation inverse de la diode I<sub>0</sub>, il peut être calculé comme suit [8][13]:

$$I_0 = \frac{I_{cc} \cdot K_I (T - T_n)}{\exp \left( \frac{V_{co} + K_7 (T - T_n)}{V_t} \right)} \dots \dots \text{(II-5)}$$

Avec KV le coefficient de variation de la tension en fonction de la température et V<sub>co</sub> est la tension de court-circuit du panneau photovoltaïque dans les conditions standard.

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

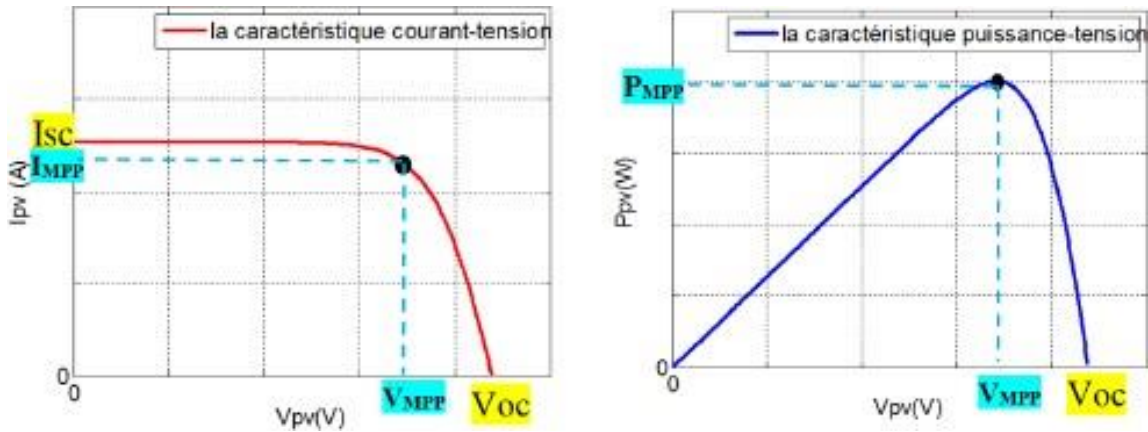
$$P = V \cdot I_{ph} - V \cdot \left( \exp \left( \frac{V+I \cdot R_s}{V_t} \right) - 1 \right) - \frac{(V+I \cdot R_s)}{R_p} \dots \dots \text{(II-6)}$$

La puissance générée par tous les panneaux, PPV, est calculé comme suit :

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

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

À partir des équations étudiées ci-dessus, Les courbes représentant les caractéristiques  $I = f(V)$  et  $P = f(V)$  d'une cellule photovoltaïque peuvent être construites (figures.17).



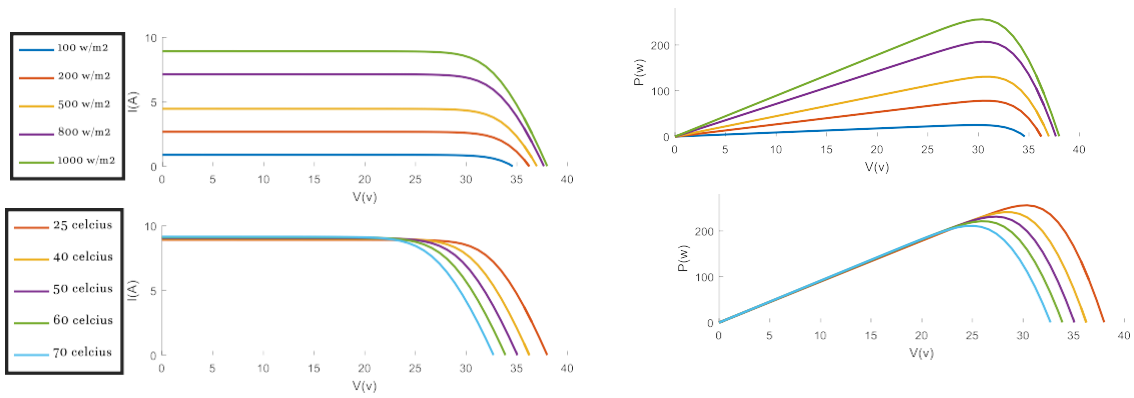
**Figure III 02** Caractéristiques V-I et V-P d'un module PV.

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

### III .2.3. Performances du générateur photovoltaïque implémenté

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

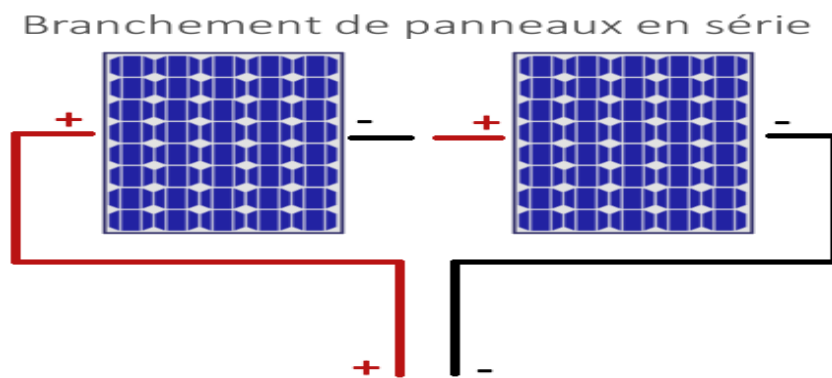
- La courbe (a) présente la caractéristique Courant-Tension du panneau PV pour différents éclairagements.
- La courbe (b) présente la caractéristique Puissance-Tension du panneau PV pour différents éclairagements.
- La courbe (c) présente la caractéristique Courant-Tension du panneau PV pour différents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



**Figure III 03 : influence de l'éclairement et de la température sur les performances d'un Panneau photovoltaïque**

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

III .2.4.Raccordement en série



**Figure III 04 . Raccordement en série**

### III.2.5. Raccordement en parallèle

Branchement de panneaux en parallèle

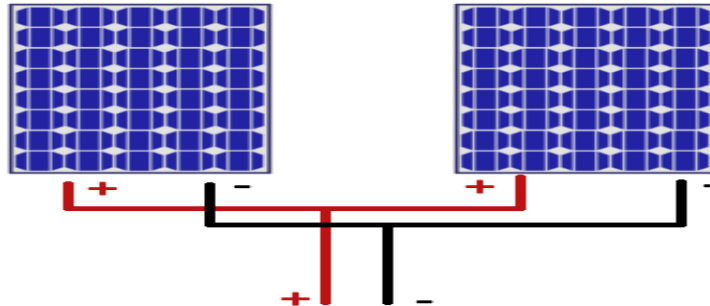


Figure III 05. Raccordement en parallèle

## III.3. Électrolyseurs et piles à combustible

### III .3.0. L'électrolyseur

Dans un système PV/PAC ,l'électrolyseur prend l'excès d'électricité des panneaux PV pour produire de l'hydrogène qui est stocké dans un réservoir d'hydrogène pour une utilisation ultérieure dans la pile à combustible (PEMFC), ce qui générera le manque d'électricité nécessaire pour alimenter la charge lorsque le PV ne peut pas répondre aux exigences de cette charge.

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

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

$$\text{H}_2\text{O} + \text{Electricité} \rightarrow \text{O}_2 + \text{H}_2 + \text{Chaleur}$$

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

### III .3.1. Modèle électrochimique

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

On se basant sur les travaux la caractéristique U-I d'un électrolyseur alcalin est définie comme :

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

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

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

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

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

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

Où  $U_0$  est la tension réversible de la cellule dans les conditions standards (V), et  $k_{rev}$  est le coefficient de température empirique de  $U_{rev}(V/^\circ C)$ . Les cellules d'électrolyseur, comme pour les cellules d'une pile à combustible, sont connectées en série, par conséquent, le courant est le même et la tension est donnée par

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

### III .3.2. Modèle thermique

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

Le bilan énergétique global peut être exprimé comme :

$$C \frac{dT}{dt} = q_{gen} - q_{perte} - q_{refroidissement} \dots\dots(\text{II-45})$$

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

$q_{gen}$  est la puissance calorifique générée à l'intérieur de l'électrolyseur. Elle peut être écrite comme :

$$q_{gen} = (V - V_{th}) \cdot I \dots (II-46)$$

$q_{perte}$  la perte de puissance calorifique. Il peut être déterminé par :

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

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

$q_{refroidissement}$  la perte de puissance calorifique dû au refroidissement, peut être exprimée par :

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

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

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

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

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

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

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

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

La solution de l'équation différentielle du bilan est donc

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

Avec

$$a = \frac{1}{R_t \cdot C_t} + \frac{C_{cm}}{C_t} (1 - \exp(-\frac{VA_{HK}}{C_{cm}})) \dots (II-53)$$

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

### III .3.3. Taux d'hydrogène produit

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

$$n_{H_2} = \eta_F \frac{N_e I}{2F} \dots (II-55)$$

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

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

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

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

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

### III .3.4. Performance du modèle de l'électrolyseur

L'influence de la température sur les caractéristiques du modèle de l'électrolyseur est donnée en Figure 21 lorsque la température de fonctionnement de l'électrolyseur augmente, la tension de sortie de ce dernier diminue.

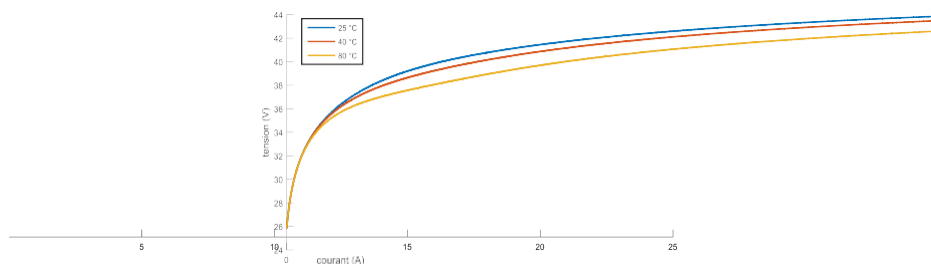
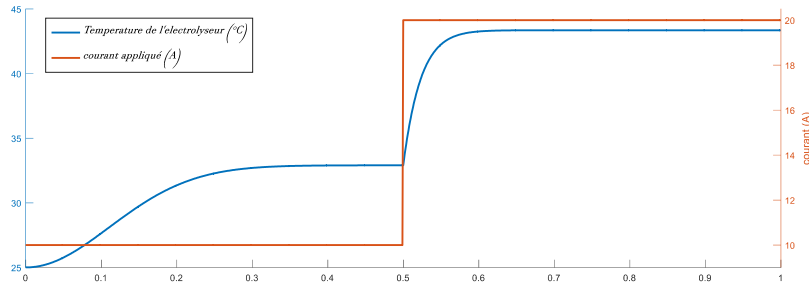


Figure III 06 : influence de la température sur la caractéristique I-V de l'électrolyseur



**Figure III 07. la réponse en température du modèle d'électrolyseur implémenté**

La figure 22 montre la réponse en température du modèle. Pour les nécessités de simulation, les températures d'entrées (température ambiante et température d'eau de refroidissement) sont supposées à 25°C. Sur une période d'une heure, dans les 30 premières minutes un courant de 10A est appliqué sur l'électrolyseur et monte de façon abrupte à 20A.

### III .4. Pile à combustible

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

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

#### III .4.1. Modèle électrochimique de la pile à combustible PEMFC

La pile à combustible prend de l'hydrogène et de l'oxygène pour former une réaction chimique, l'hydrogène se dissocie en protons et électrons. La réaction chimique est donnée comme suit :  $H_2 + \frac{1}{2} O \rightarrow H_2O$

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

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

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

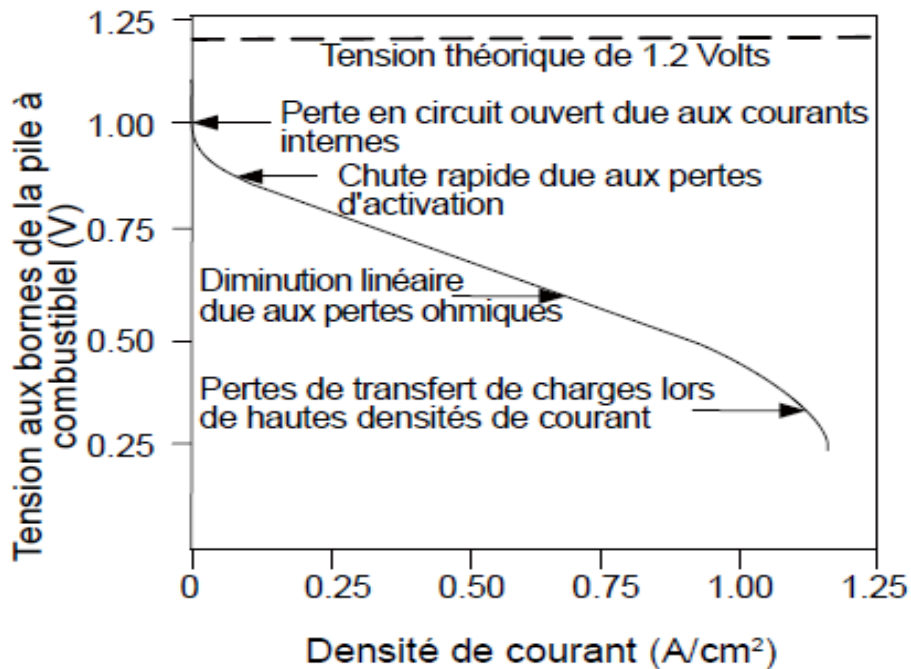


Figure : III 08. Courbe de polarisation d'une pile à combustible.

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

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

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

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

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

Où  $\Delta G^\circ$  est un travail électrique appelé énergie libre de Gibbs,  $z$  est le nombre d'électrons participants à la réaction,  $F$  est la constante de Faraday,  $\Delta S$  est l'entropie spécifique,  $T$  est la température absolue opérationnelle,  $T_0$  est pris comme 25°C et  $R$  est la constante universelle des gaz parfaits (8.314 J/K · mol).  $P_{O_2}$ ,  $P_{H_2}$ ,  $P_{H_2O}$  sont respectivement la pression d'oxygène pur, d'hydrogène et de H<sub>2</sub>O.

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

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

Les pressions partielles d'hydrogène et d'oxygène sont

$$P_{H_2} = 0.5 \frac{P_{sat}}{P_{H_2O}} \left[ \exp \left( -\frac{1.635 \cdot 10^4}{T \cdot 1.334} \right) \cdot \frac{P_{anode}}{P_{H_2O}^{sat}} - 1 \right] \dots \dots (II-12)$$

$$P_{O_2} = \frac{P_{sat}}{P_{H_2O}} \left[ \exp \left( -\frac{4.192 \cdot 10^4}{T \cdot 1.334} \right) \cdot \frac{P_{cathode}}{P_{H_2O}^{sat}} - 1 \right] \dots \dots (II-13)$$

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

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

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

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

### III .5. 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)

### III .5.1.Polarisation d'activation

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

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

D'autre part, une équation empirique pour  $\eta_{act}$ , où une constante  $a_0$  est ajoutée comme suit à l'équation précédente :

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

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

### III .5.2. Polarisation ohmique

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

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

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

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

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

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

### III .5.3. Polarisation de concentration

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

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

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

### III .5.4. Potentiel réel global

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

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

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

### III .6. Modèle thermique de la pile à combustible

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

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

Où  $\dot{q}_{chem}$  représente l'énergie calorifique ou chimique,  $\dot{q}_{elec}$  est l'énergie électrique,

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

L'énergie libérée par réaction chimique est calculée par

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

Avec  $\dot{\eta}_{H_2}$ , le débit molaire d'hydrogène consommé, et  $\Delta G$  l'énergie libre de Gibbs. L'énergie électrique est calculée comme suit :

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

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

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

$C_{H_2,0,c}$ ,  $C_{H_2O,l}$  sont des capacités calorifiques spécifiques en [J/mol.K],  $H_v$  est la vaporisation thermique de H<sub>2</sub>O en [J/mol],  $\dot{\eta}_{H_2O,g}$  est le débit molaire généré de H<sub>2</sub>O en [mol/s], et  $\dot{\eta}_{O_2,c}$  est le débit molaire d'oxygène consommé.

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

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

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

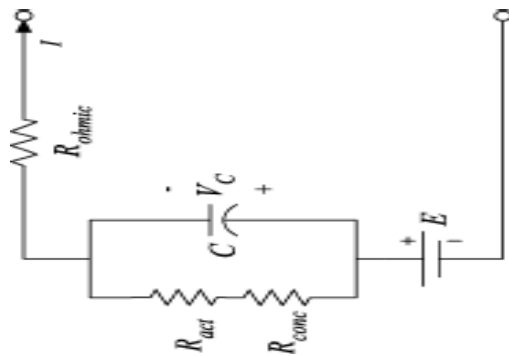
En régime permanent  $q_{net} = 0$ , la pile à combustible fonctionne à température constante. Pendant le régime transitoire, la température dans la pile à combustible varie selon l'expression suivante :

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

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

**III .6.1. Modelé électrique dynamique de la PEMFC**

Dans une pile à combustible PEM, un phénomène connu sous le nom de "double couche chargée" est observé. Les électrons à l'anode traversent la charge externe et arrivent à la cathode, où les ions d'hydrogène arriveront en même temps. En conséquence, deux couches chargées de polarité opposée sont formées à travers la frontière entre la cathode et la membrane. Cette couche peut ainsi être considérée comme un condensateur électrique. La collecte des charges développe une électricité qui correspond à la tension d'activation et à la tension de concentration comme discuté ci-dessus. Ainsi, il y a un certain temps après lequel les tensions d'activation et de concentration permettent au courant de passer. Mais la chute de tension ohmique correspond instantanément à la variation de courant .Ce comportement peut être décrit par un modèle de circuit électrique équivalent comme le montre la figure III 09



**Figure III 09 : schéma électrique équivalent de la PAC.**

Considérant  $V_c$  comme la tension dynamique aux bornes de la capacité électrique équivalente,  $C$ , l'équation de tension de la cellule peut s'écrire en utilisant les annotations de la figure III 09 comme :

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

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

Où  $\tau$  est la constante de temps pour le circuit RC donnée par :

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

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

$$VPAC = ENernst - Vact1 - Vohm - VC.....(II-31)$$

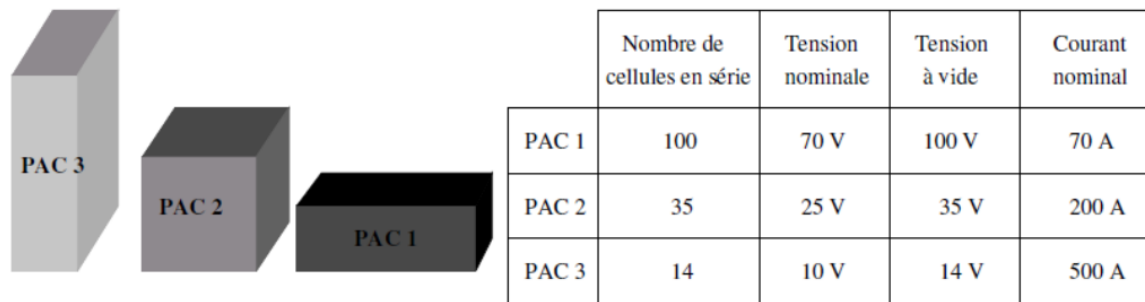
**III.6.2. Dimensionnement de stack :**

Pour concevoir la pile à combustible correspondant au cahier des charges d'un projet donné,

Le concepteur dispose de deux degrés de liberté :

- Le nombre N de cellules mises en série qui fixe la tension du stack.
- La surface S d'une cellule qui fixe le courant du stack.

La Fig. III 10 illustre cette notion de modularité dans la conception d'un stack.



**Figure. III 10 : Modularité d'un stack : 3 exemples de conception d'une PAC de 5 kV**

Les limites technologiques actuelles semblent être :

- $N \leq 100$  dans le cas de plaques bipolaires en graphite. Le nombre est a priori beaucoup plus important dans le cas de plaques bipolaires métalliques.
- Densité de courant  $\leq 1 A.cm^{-2}$ .
- $S \leq 800cm^2$ . Les caractéristiques nominales typiques d'une cellule sont :
- Tension typique d'utilisation nominale d'une cellule : 0,7V.
- Tension (pratique) à vide d'une cellule : 1V.

### III .7. Stockage d'hydrogène

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

#### III .7.1. Technologie de stockage d'hydrogène

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

##### III .7.1.1. Stockage sous forme gazeuse

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

Ainsi, à 700 bars, l'hydrogène possède une masse volumique de 42 kg/m<sup>3</sup> contre 0.090 kg/m<sup>3</sup> à pression et température normales. À cette pression, on peut stocker 5 kg d'hydrogène dans un réservoir de 125 litres.

##### III .7.1.2. Stockage sous forme liquide

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

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

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

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

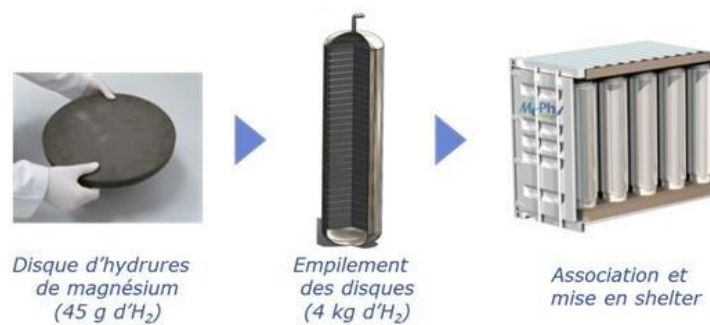


**Figure III 11: réservoir cryogénique développé par magna Steyr**

### III .7.1.3. Stockage sous forme solide

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

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



**Figure III 12 : stockage d'hydrogène sous forme solide.**

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

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

### III .7.2.Comparaison des différentes techniques de stockage

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

### III .8. Conclusion

Jusqu'à maintenant nous avons sélectionnée les modèles convenable et compatible à la l'architecture du système choisie. De nombreux paramètres sont modifiables permettant de prendre en compte les améliorations du système.

Le système hybride PV-ELC-PAC étudié est conçu pour devoir générer, stocker et assurer l'énergie électrique aux charges. Il est simulé pour prévoir son exécution avant conception. Ce système est souvent installé dans des régions rurales et éloignées. L'optimisation du système est l'un des facteurs important, notamment les tailles composantes et la gestion d'énergie ainsi de divers paramètres influençant et remplit efficacement les conditions de system. Des modèles mathématiques des composants de système sont reliés ensemble pour former une représentation générale du système entier, par un contrôleur d'énergie central qui définit la manière dont les composants agit l'un sur l'autre pour simuler l'opération du système entier. Tous les composants du système ont été modelés et validés.



# **Chapitre IIIV**

**Etude technico-économique  
du système PV-EL-PAC**



### IV.1.Introduction

Dans notre étude, nous avons choisis de travailler avec le logiciel HOMER. «Hybrid Optimization Of Multiple Energy Ressources » pour la partie de dimensionnement en suite nous avons ajouté la partie expérimentale concernant la caractérisation de la pile utilisée.

- HOMER :

(Hybrid Optimization Model for Electric Renewables) : Le logiciel, développé au NREL (National Renewable Energy Laboratory), est un modèle informatique qui simplifie le dimensionnement de systèmes hybrides pour des applications en sites isolés ou raccordés réseau. HOMER exécute trois tâches : simulation, optimisation et analyse de sensibilité. Il permet d'évaluer la faisabilité économique et technique d'un grand nombre de combinaisons technologiques en prenant en compte les variations des coûts technologiques et la disponibilité de la ressource énergétique.

Les sous-systèmes pouvant être utilisés par HOMER sont les suivants : PV, éolien, micro-hydraulique, électrolyseur, batterie, PAC et réservoir d'hydrogène. Dans son processus de simulation, HOMER détermine la faisabilité technique et le coût de fonctionnement, en utilisant des données horaires d'une année météorologique moyenne. Pour effectuer le bilan énergétique, HOMER compare l'énergie électrique et thermique capable d'être fournie à celle demandée pour chacune des heures de l'année. Les résultats sont les flux énergétiques, au pas de temps horaire, en entrée ou en sortie de chaque composant du système. Pour les systèmes qui incluent des batteries ou des réservoirs d'H<sub>2</sub>, HOMER décide à quel moment ces sous-systèmes doivent être chargés ou déchargés. Dans son processus d'optimisation, HOMER simule toutes les configurations de systèmes possibles, renonce à celles qui ne satisfont pas les contraintes définies, et affiche une liste des systèmes réalisables en les classant selon leur coût de fonctionnement et trouve celui qui satisfait les contraintes techniques au plus bas coût.

### IV.2.Présentation du système d'étude

Le système considéré dans ce travail et schématisé dans la Fig.28 il est composé d'un générateur photovoltaïque, électrolyseur, pile a combustible et réservoir du stockage d'hydrogène et les batteries d'accumulateur, des convertisseurs, la charge (un bâtiment administratif )

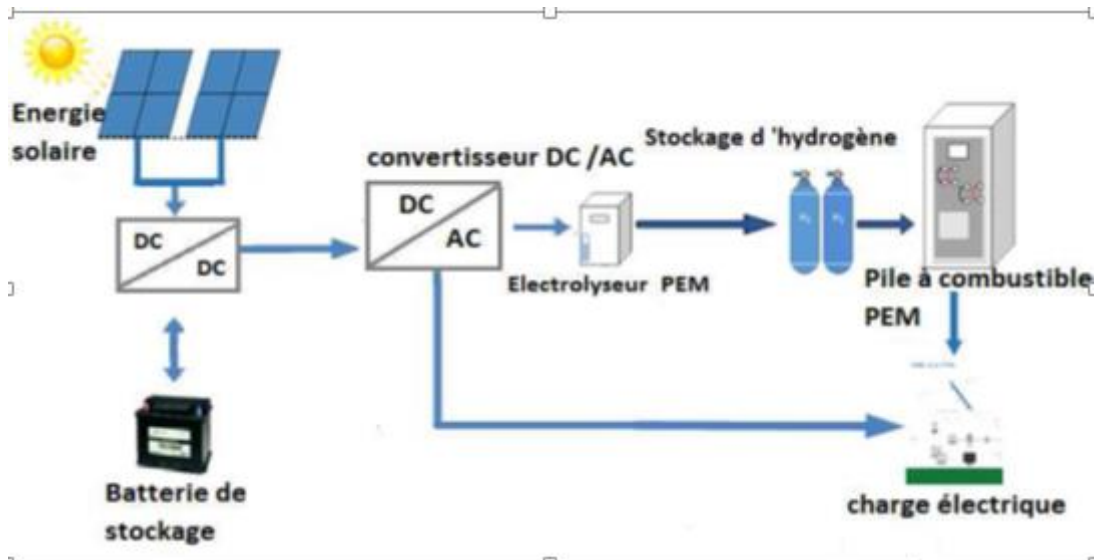


Fig. IV 01. Le schéma global du système étudié

### IV.3.Principe de fonctionnement du système

Le système à étudier est un système hybride basé sur deux sources d'énergie renouvelable solaire et une pile à combustible pour l'alimentation d'un bâtiment qui contient l'ensemble des dispositifs électriques (ordinateur portable, imprimant, lampe, climatiseur).

Pendant la journée, Les panneaux solaires alimentent notre charge et l'excédent d'énergie sera chargé dans les batteries et alimente aussi l'électrolyseur d'eau, ce dernier produise de l'hydrogène afin de stocker le réservoir d'hydrogène pour alimenter la pile à combustible.

Pendant la nuit, la pile à combustible consomme l'hydrogène qui a été stocké dans les bouteilles afin d'assure l'alimentation de la charge à l'aide la pile à combustible et lorsque la pile ne peut pas accomplir le besoin de la charge la batterie aussi rentre pour compenser l'alimentation.

#### IV.3.1.Procédure d'évaluation de coût global du système dans l'HOMER

Lorsque on démarre une étude dans l'Homer, il faut spécifie le coût des composantes utilisées et les autres coûts tell que le coût initial , le coût de remplacement et le coût d'opération et de maintenance ( $C_o$ ), la définition de chaque cout est détaillé ci-dessous:

##### IV.3.1.1.Coût initial ( $C_i$ )

Pour toutes les sources nous avons un cout initial correspondant `à l'achat des différents éléments, ces coûts ne sont pas `actualiser car nous considérons que les achats sont faits au début du projet. En réalité ils sont faits un peu avant le début du projet.

#### IV.3.1.2. Coût de remplacement (Cr)

Chaque composant du système a une durée de vie. Il doit être remplacé périodiquement sur toute la durée du fonctionnement du système hybride, dans les plupart des cas, le générateur éolien et le générateur photovoltaïque ont une durée de vie proche de la durée de vie du système, donc un coût de remplacement pratiquement nul.

#### IV.3.1.3. Coût d'opération et de maintenance (Co)

Doivent être calculés, déterminer les coûts d'opération et de maintenance des différentes sources durant les années du projet. Ces coûts doivent donc être actualisés et correspondent à une maintenance de révision, de renouvellement de consommables (huiles, filtres, etc) et de vérification des éléments.

#### IV.3.1.4. Coût de salvage (Cs)

Le coût dit de salvage (terme Anglais) est le prix que l'on peut récupérer à la fin de vie si l'on revendait le reste de vie de chacun de nos éléments. Pour calculer ceci nous devons calculés la portion de vie utilisée à partir du dernier remplacement.

#### IV.3.1.5. Coût total net actuel du système (NPC)

Est une valeur actualisée de tous les coûts encourus par le système pendant sa durée de vie, moins la valeur actualisée de tous les revenus qu'il génère pendant sa durée de vie. Les coûts comprennent les coûts en capital, les coûts de remplacement, les coûts d'exploitation et d'entretien, les coûts du combustible, les pénalités sur les émissions et les coûts d'achat de l'électricité du réseau. Les produits comprennent la valeur de récupération et les produits tirés de la vente des réseaux.

#### IV.3.1.6. Déclaration des contraintes du système dans HOMER

Les contraintes s'associent à la réserve d'exploitation, la capacité maximale du stockage annuelle, fraction minimale de l'énergie renouvelable que le système devrait satisfaire, la valeur la plus connue

pour le déficit de capacité annuel maximale du système est zéro, de telle sorte que lorsque le système fonctionne à cette valeur, les sources d'alimentation doivent satisfaire à 100 % la charge électrique avec plus de réserve de fonctionnement requise dans ce cas les chances ou les moments d'interruption d'énergie sont très minium et cette critère plus important lorsque le système dédié d'alimenter des charges sensibles à l'interruption d'énergie où les systèmes qui sont approvisionnés en tout temps, et dans ce cas sont nécessaires de laisser la capacité annuelle maximale à zéro mais le système devient couteux, par contre lorsqu'on a accepté un déficit de capacité annuelle maximale du système entre 1% et 5% c-t-dire on a augmenté la possibilité de l'interruption de l'énergie électrique à la charge qui provoque une diminution de cout para port le premier cas , la figure suivant montre la fenêtre de sélection des contraintes Fig. IV 02

**Constraints**

File Edit Help

Constraints are conditions that systems must meet to be feasible. Infeasible systems do not appear in the sensitivity and optimization results. Operating reserve provides a margin to account for intra-hour deviation from the hourly average of the load or renewable power output. HOMER calculates this margin for each hour based on the operating reserve inputs.

Hold the pointer over an element name or click Help for more information.

Maximum annual capacity shortage (%)  (.)

Minimum renewable fraction (%)  (.)

Operating reserve

As percent of load

Load in current time step (%)  (.)

Annual peak load (%)  (.)

As percent of renewable output

Solar power output (%)  (.)

Wind power output (%)  (.)

Note: HOMER calculates the total required operating reserve for each time step by multiplying each of these four inputs by the load or output value for that time step and adding the results.

Primary energy savings

Minimum primary energy savings (%)  (.)

Reference electrical efficiency (%)  (.)

Reference thermal efficiency (%)  (.)

Help Cancel OK

**Fig. IV 02. Fenêtre de déclaration des contraintes du système**

#### IV.3.1.7. Sélection le temps de fonctionnement du composant du système

Dans l'HOMER il y a la possibilité de sélection le temps de fonctionnement de quelque composant dont dans ce logiciel il y a le choix de fonctionnement de telle sorte que :

Soit l'Homer choisie seul le temps de fonctionnement du système ou l'utilisateur qui choisie le temps de fonctionnement ou le temps de repos de cette composant, par exemple la pile à combustible ou l'électrolyseur, la Fig. 30 montre la matrice de choix de temps de fonctionnement.

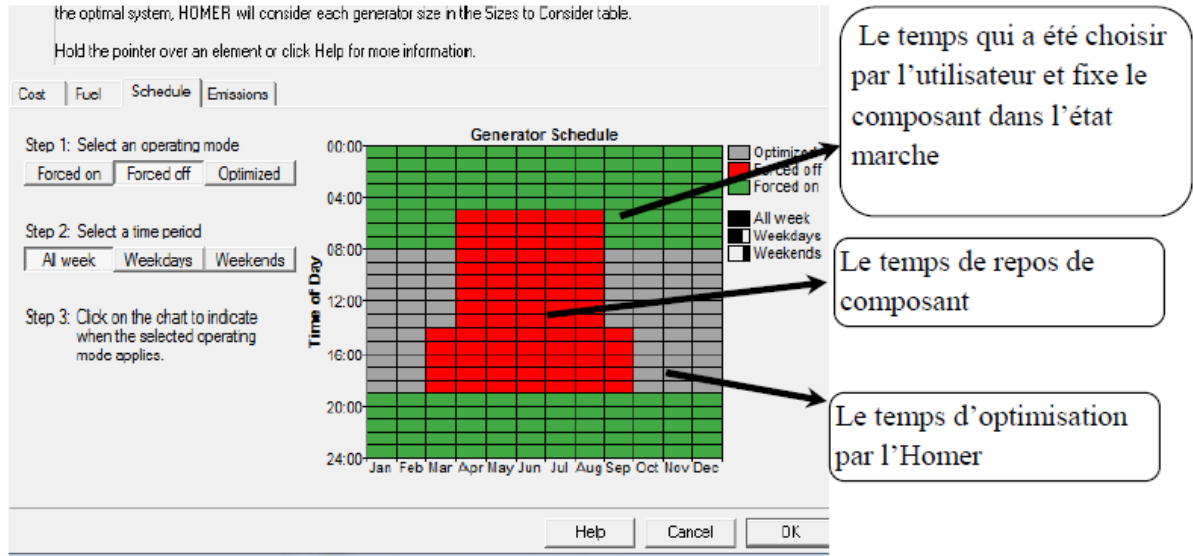


Fig. IV 03. Le choix de temps de fonctionnement de composant

**IV.3.8.Déclaration les donnes nécessaire des composants**

Les données à faire rentrer sont celles reliées à la zone 1 et 2 du logiciel HOMER. Il s'agit des données reliées à la consommation énergétique, aux équipements (panneaux solaires photovoltaïques, éoliennes, génératrices, onduleurs, batteries ou autres équipements) et aux ressources nécessaires comme les données de gisement solaire ou éolien, aussi bien que les données reliées au combustible utilisé par la génératrice, il y a aussi certains paramètres économiques que l'on peut modifier. D'autres paramètres permettent différents contrôles du système (surtout au niveau de la simulation des banques des batteries et des génératrices). Dans la zone des ressources, on peut aussi mettre des pénalités monétaires pour les émissions émises ou bien un seuil limite d'émissions à ne pas dépasser lorsque la simulation sera effectuée.

Finalement, certaines contraintes peuvent être exigées comme une fraction minimale d'énergie renouvelable à avoir dans le système. Une fois toutes les sections remplies, on peut lancer la simulation en cliquant sur l'icône « calculer » Fig. 31

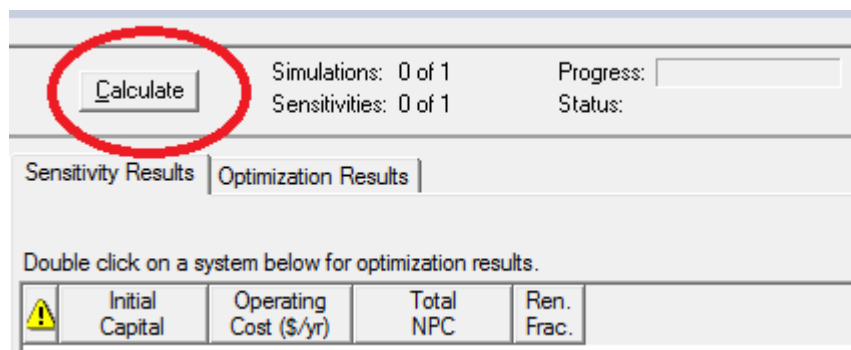


Fig. IV 04. Lancement de simulation dans HOMER

IV.4. Etude techno économique Système PV-Electrolyseur- PAC

Le système étudié dans notre cas est illustre ci-dessous:

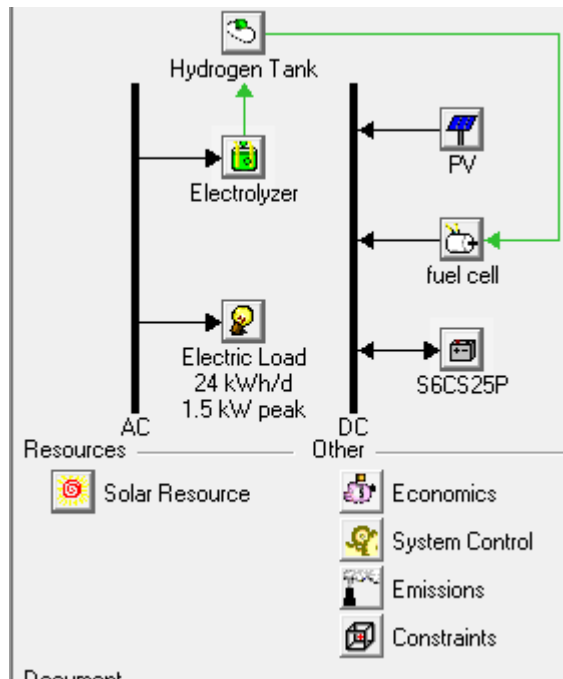


Fig. IV 05. Schéma générale du système PV-PAC –Electrolyseur sur HOMER.

IV.4.1. Description le site d'étude

Le cas choisi de cette étude est un bâtiment administratif ce dernier située dans La ville de Laghouat au SUD de l'Algérie à l'altitude : 33°,8" N et longitude : 2°,8763" E.

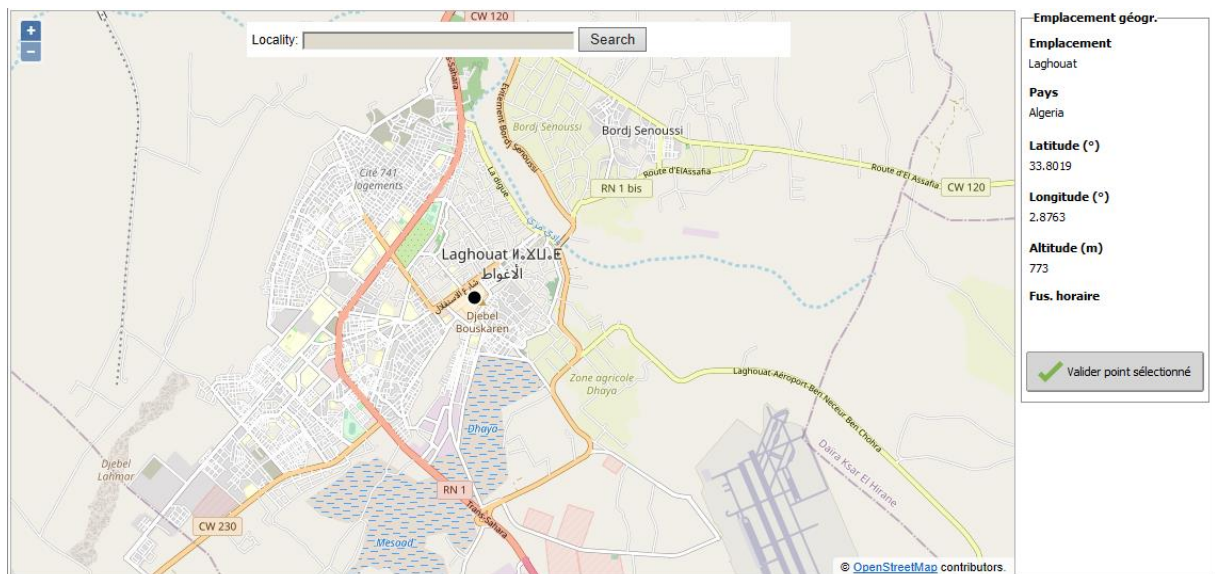


Fig. IV 06. Emplacement géographique de site de Laghouat (PV Sys7.1)

#### IV.4.2. Analyse de la Charge

Pour concevoir et optimiser tout système, il est essentiel de comprendre et d'étudier les exigences de la charge de l'emplacement souhaité. Cette étape est cruciale lors de la conception d'un système, sans laquelle elle pourrait mener à une sous-estimation ou à une surestimation de la consommation. Par conséquent, il est très important de comprendre le comportement stochastique de l'énergie disponible pour servir la charge. Nous avons choisi le système d'énergie renouvelable hybride à étudié dans la région de Laghouat au noter charge d'un Bâtiment

La consommation moyenne d'énergie du bâtiment administratif est de 27 kWh/jour pour les différentes charges, la valeur de peak de mois est estimée à 4,2 kW. L'équipement le plus fréquemment utilisé se résume à : l'éclairage, Ordinateur portable la Pressé (chargeur de la batterie pour mobile..), réfrigération, Climatiseur, et plus d'autres appareils.

La pic d'énergie demandée situé le matin entre 8:00h -12:00h avec demande moyenne d'énergie dans l'intervalle de 15 :00h - 17 :00 h.

**Tab. IV 01 : La consommation des appareils considérés dans un bâtiment**

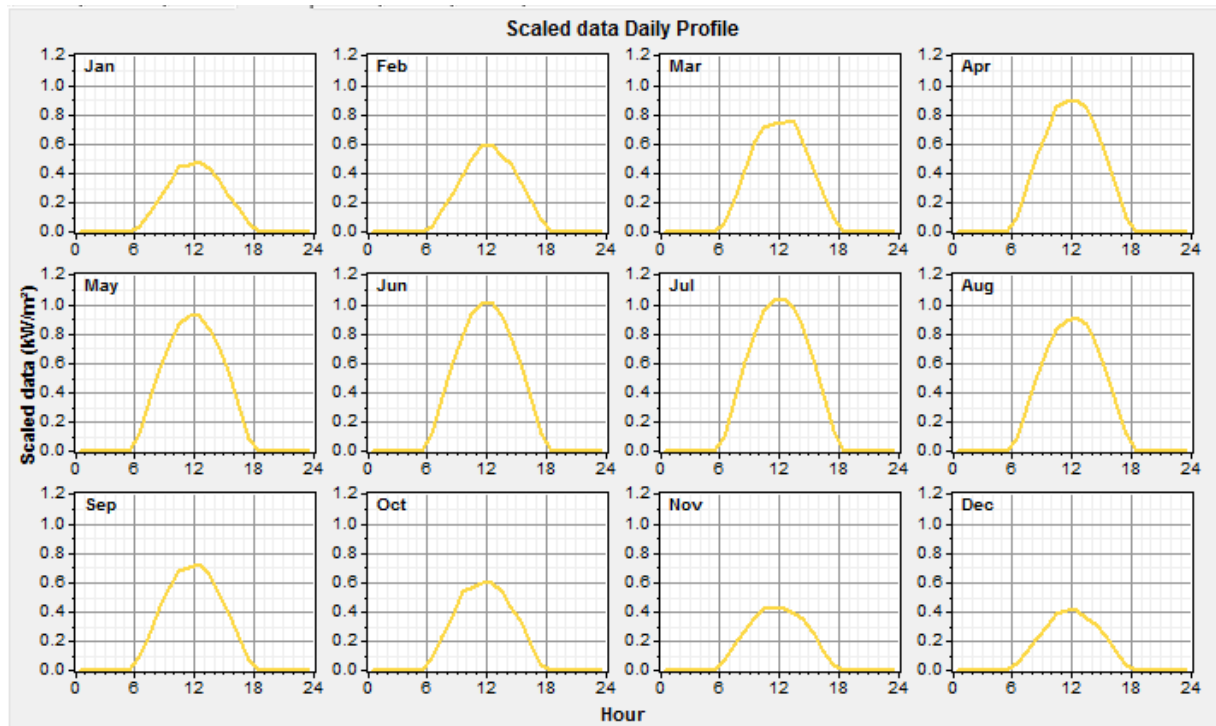
Type d'appareille électrique	Nombre	La puissance électrique (W/h)	Durée d'utilisation
Ordinateur portable	<b>3</b>	<b>50</b>	<b>11</b>
Imprimant	<b>1</b>	<b>500</b>	<b>6</b>
Lampe d'éclairage	<b>3</b>	<b>72</b>	<b>11</b>
Fontaine fraîche d'eau	<b>1</b>	<b>100</b>	<b>24</b>
Routeur Wifi	<b>1</b>	<b>20</b>	<b>11</b>
Pressé (chargeur smart phone)	<b>6</b>	<b>20</b>	<b>11</b>
Climatiseur	<b>1</b>	<b>1200</b>	<b>11</b>
Réfrigérateur	<b>1</b>	<b>100</b>	<b>24</b>

Dans le tableau suivant Tab 6 on a présenté un exemple sur la charge qui a été consommé dans le mois de décembre avec le temps de fonctionnement de chaque composante.

Tab. IV 02 . Estimation de la consommation de puissance en décembre en KW

Heure	Imprimant	Réfrigérateur	Lampe d'éclairag	Climatiseur	Ordinateur portable	Pressé (chargeur smart phone	Routeur Wifi	Fontaine fraiche	total on (KW)
00 :00	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0,1
01 :00	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0,1
02 :00	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0,1
03:00	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0,1
04:00	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0,1
05:00	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0,1
06:00	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0,1
07:00	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0,1
08:00	0,5	0,1	0,21	0	0,5	0,12	0,02	0	1,45
09:00	0,5	0,1	0,21	0	0,5	0,12	0,02	0	1,45
10:00	0,5	0,1	0,21	0	0,5	0,12	0,02	0	1,45
11:00	0,5	0,1	0,21	0	0,5	0,12	0,02	0	1,45
12:00	0	0,1	0	0	0	0	0,02	0	0,12
13:00	0,5	0,1	0,21	0	0,5	0,12	0,02	0	1,45
14:00	0,5	0,1	0,21	0	0,5	0,12	0,02	0	1,45
15:00	0,5	0,1	0,21	0	0,5	0,12	0,02	0	1,45
16:00	0	0,1	0,21	0	0,5	0,12	0,02	0	0,95
17:00	0	0,1	0,21	0	0,5	0,12	0,02	0	0,95
18:00	0	0,1	0,21	0	0,5	0,12	0,02	0	0,95
19:00	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0,1
20:00	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0,1
21:00	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0,1
22:00	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0,1
23:00	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0,1
<b>Totale</b>									14.42

La profile de consommation de ce mois dans HOMER est illustré ci-dessous



**Fig. IV 07. Le profil de charge journalière suivant les saisons**

#### IV.4.3. Potentiel solaire de la ville de Laghouat

L'irradiation solaire est donnée pour l'endroit de longitude :  $2^{\circ},8763''$  Est et l'altitude :  $33^{\circ},80''$  Nord. Les données solaires pour cette ville ont été obtenues à partir du site d'évaluation du gisement solaire " PV-GIS "[9] qui est un outil on-line pour estimer l'irradiation solaire de plusieurs villes selon l'endroit, l'inclinaison et l'orientation.

Les graphique Fig. 35 montrent le profil solaire de ressource sur une période d'une année telle que mesurée sur une surface horizontale, le rayonnement solaire mensuel varie entre 3.116 [kWh/m<sup>2</sup>/j] Au mois de Décembre et 8.235 [kWh/m<sup>2</sup>/j] en juillet, une irradiation solaire globale horizontale, moyenne annuelle de 5.690 kWh/m<sup>2</sup>/j . Sur la surface incliné à 30°C.

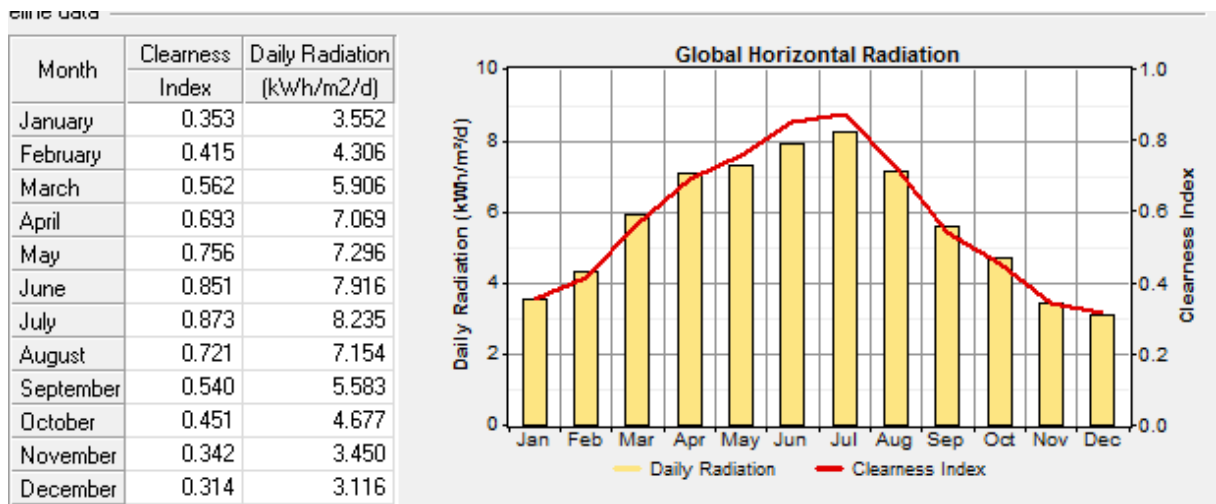


Fig. IV 08 . Irradiation solaire annuelle

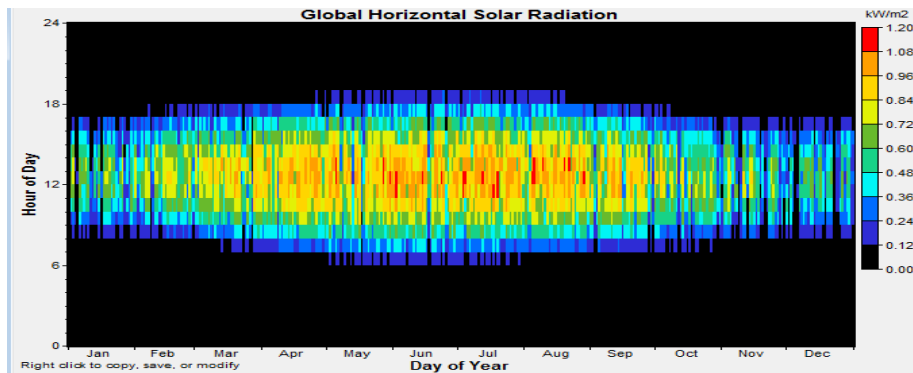


Fig. IV 09. DMAP d'irradiation solaire globale horizontale

La Fig. IV 09 montre l'irradiation, solaire globale horizontale dans le graphe DATA MAP, On peut remarquer que l'irradiation existe toute la journée avec des grandes valeurs cette irradiation situe dans un mois d'été.

**IV.5.L'optimisation du système PV-PAC –Electrolyseur dans HOMER**

L'optimisation du système dans HOMER est basé sur le coût et le dimensionnement, dans cette partie nous définissons les spécifications technique le coût initial et le coût de remplacement du chaque composant.

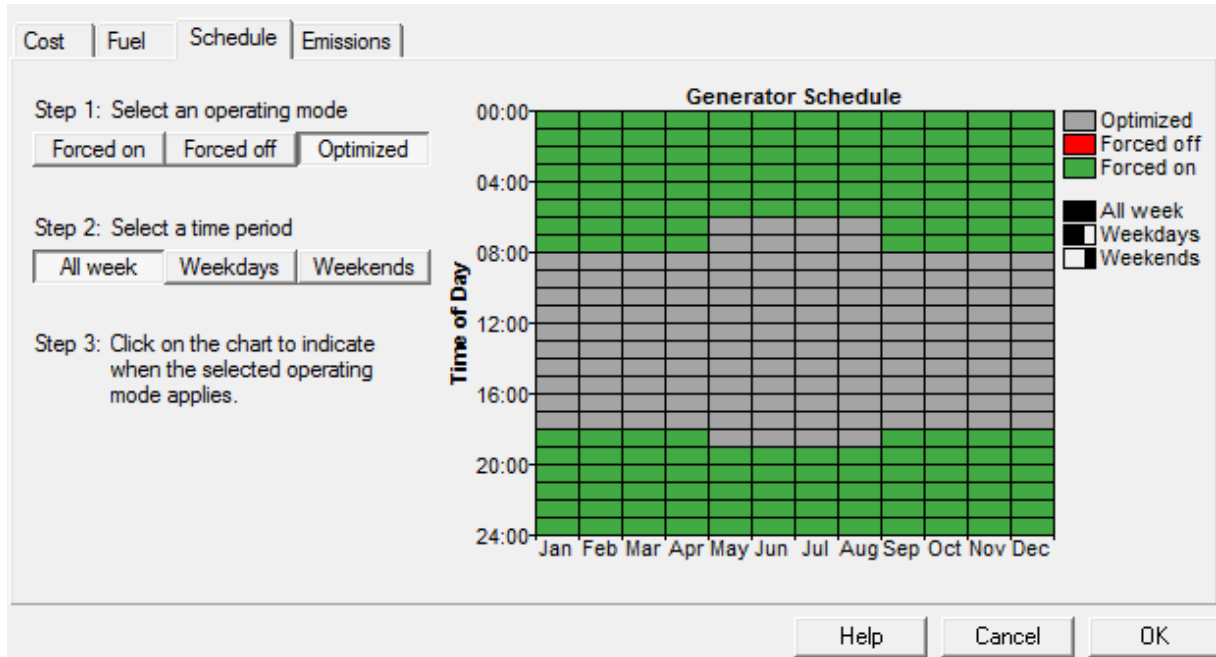
**IV.5.1.Le générateur photovoltaïque**

Le coût initiale et de remplacement des panneaux photovoltaïque étant de 1000 \$ / KW [11]. Le coût de maintenances considérées pratiquement nul [10], et La durée de vie des panneaux PV 25 ans, le rendement de la cellule est considéré de 13% dans la condition standard, le panneau est fixé à l'angle d'altitude de Laghouat

### IV.5.2.La pile à combustible

Le coût des piles à combustible varie selon le type de la technologie, de la taille, des auxiliaires installés,... etc. Le coût de pile à combustible est 1500\$/ KW [11]. Et Le coût de remplacement est de 1500 \$ et de maintenance de 0.080 \$ / h. La durée de vie est de 40000 heures de fonctionnement, le rendement est de 42%

Le temps de fonctionnement de la pile est entre 18:00-8:00 en hiver 19:00-6:00 h en en été



**Fig. IV 10. Le temps de fonctionnement de la pile**

### IV.5.3.L'électrolyseur

Le coût de l'électrolyseur est de 1500 \$/kW, le coût de remplacement est de 1000\$/kW et le coût de maintenance est de 20 \$/an [11]. La durée de vie est de 25 ans, et l'efficacité considérée est de 85%. Et le taux de charge minimal est de 10%.

### IV.5.4.La batterie

Pour stocker l'énergie des générateurs photoélectriques et l'alimentation pendant la nuit, les batteries doivent être installées dans le système.

Pour stocker l'énergie des générateurs PV et l'alimentation pendant la nuit, nous devons utiliser des batteries dans le système. le type des batteries utilisé dans ce système est les batteries du plomb- acide Surette 6CS25P. De tension de 6 V et une capacité de 1156 Ah. Le rendement aller-retour est de 80 %. La durée de vie minimale de batterie est de 3 ans, qui peut varier en fonction du nombre de cycles de charge.

Le coût initial et le coût de remplacement de chaque batterie sont considérés 1150 \$ et 110 \$[40].

Le coût de fonctionnement et de maintenance des batteries est 10\$.

**IV.5.5.Le réservoir d'hydrogène**

Le coût du réservoir est 1200 \$/kW, le coût de remplacement est 800\$/kW et le coût de maintenance est 15 \$/an [11]. La durée de vie est 25 ans.

**IV.5.6.Le convertisseur**

Les sources d'énergie du système d'énergie sont toutes basées sur le courant continu, mais la charge est basée sur le courant alternatif. , l'utilisation d'onduleurs est nécessaire pour la conversion du courant continu en courant alternatif.

Le coût initial et le coût de remplacement par kilowatt d'onduleur sont considérés 800 \$ et 750

\$(11). Le rendement d'onduleur 90%.

**IV.5.7.Données économiques:**

Nous définissons les données économiques comme suit :

- Capacité annuelle du stockage : 0%
- Durée de vie du projet : 25 ans.
- la déficit de capacité annuel maximale du système: 5%

**IV.6.Interprétation des résultats de simulation**

Après le démarrage de calcul d'optimisation, nous avons obtenu les résultats suivants :

Sensitivity Results		Optimization Results													
Double click on a system below for simulation results.															
	PV (kW)	Label (kW)	S6CS25P	Conv. (kW)	Elec. (kW)	H2 Tank (kg)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Capacity Shortage	Label (hrs)	Batt. Lf. (yr)	Overall
	14.50	1.5	8	5.1	3.8	3.5	\$ 39,930	946	\$ 52,028	0.426	1.00	0.05	2,967	12.0	
	14.44	1.5	8	5.1	4.0	3.5	\$ 40,170	959	\$ 52,427	0.430	1.00	0.05	2,986	12.0	
	14.50	1.5	8	5.1	4.0	3.5	\$ 40,230	960	\$ 52,496	0.430	1.00	0.05	2,990	12.0	
	14.44	1.5	8	5.1	4.0	3.6	\$ 40,290	961	\$ 52,575	0.431	1.00	0.05	2,987	12.0	
	14.50	1.5	8	5.0	4.0	3.7	\$ 40,390	958	\$ 52,633	0.431	1.00	0.05	2,973	12.0	
	14.44	1.5	8	5.1	4.1	3.5	\$ 40,320	964	\$ 52,641	0.431	1.00	0.05	2,988	12.0	
	14.50	1.5	8	5.1	4.0	3.6	\$ 40,350	962	\$ 52,644	0.431	1.00	0.05	2,991	12.0	
	14.50	1.5	8	5.0	4.1	3.6	\$ 40,420	961	\$ 52,709	0.432	1.00	0.05	2,979	12.0	
	14.50	1.5	8	5.1	4.1	3.5	\$ 40,380	965	\$ 52,710	0.432	1.00	0.05	2,992	12.0	
	14.44	1.5	8	5.1	4.0	3.7	\$ 40,410	963	\$ 52,723	0.432	1.00	0.05	2,988	12.0	
	14.44	1.5	8	5.1	4.1	3.6	\$ 40,440	966	\$ 52,789	0.433	1.00	0.05	2,989	12.0	
	14.50	1.5	8	5.1	4.0	3.7	\$ 40,470	964	\$ 52,794	0.432	1.00	0.05	2,993	12.0	
	14.44	1.5	8	5.1	4.2	3.5	\$ 40,470	969	\$ 52,851	0.433	1.00	0.05	2,988	12.0	
	14.50	1.5	8	5.0	4.1	3.7	\$ 40,540	964	\$ 52,857	0.433	1.00	0.05	2,980	12.0	
	14.50	1.5	8	5.1	4.1	3.6	\$ 40,500	967	\$ 52,857	0.433	1.00	0.05	2,993	12.0	
	14.50	1.5	8	5.1	4.2	3.5	\$ 40,530	969	\$ 52,921	0.433	1.00	0.05	2,993	12.0	
	14.50	1.5	8	5.0	4.2	3.6	\$ 40,570	966	\$ 52,923	0.434	1.00	0.05	2,981	12.0	
	14.44	1.5	8	5.1	4.1	3.7	\$ 40,560	968	\$ 52,937	0.434	1.00	0.05	2,990	12.0	
	14.44	1.5	8	5.1	4.2	3.6	\$ 40,590	971	\$ 52,998	0.434	1.00	0.05	2,989	12.0	
	14.50	1.5	8	5.1	4.1	3.7	\$ 40,620	969	\$ 53,007	0.434	1.00	0.05	2,995	12.0	

**Fig. IV 11 : Résultats de l'optimisation du système (bâtiment administratif)**

A partir de ces résultats, nous constatons que le système hybride idéal utilisé est celui qui contient :

<b>PV 14.5 KW</b>	<b>L'électrolyseur 3.8 KW</b>
<b>PAC 1.5 KW</b>	<b>batterie S6CS25P 8</b>
<b>Réservoir de <math>H_2</math> 3.5 Kg</b>	<b>Convertisseur 5.1 KW</b>

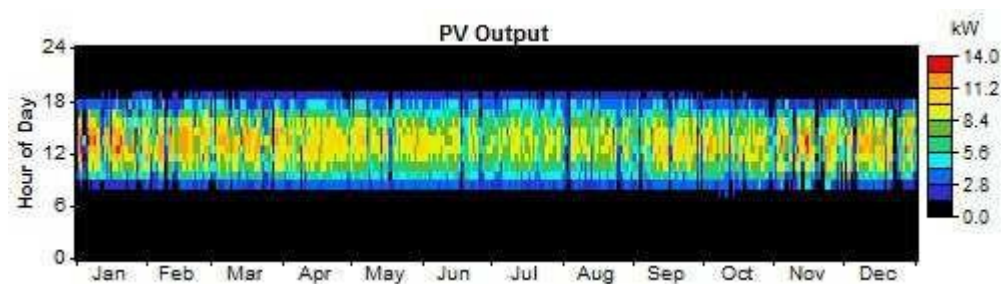
**Fig IV 12 .Conception du système hybride**

L'HOMER classe les résultats dans la liste de la Fig. 38 selon la valeur du NPC (Net Présent Cost) et le coût initial de projet, On remarque que le meilleur système utilisé et le système de premier résultat. Dans la figure Fig. 39 le système montré a un coût initial de projet 39 930 \$ l'équivalente 5989500 DA, un coût total net actuel du système 52 028 \$/ 25 ans avec (0.426\$/KWh). Les résultats ont été répartis comme suit :

Nous trouvons que le coût le plus élevé dans le système utilisé est représenté par le prix des panneaux photovoltaïques (avec initiale coût de : 14,500\$ ), et les batteries (a initiale coût de: 9200\$ )avec un coût de remplacement égale (4,862\$) et (salvage) de (-857\$).

#### IV.6.1.Panneaux solaires (PV)

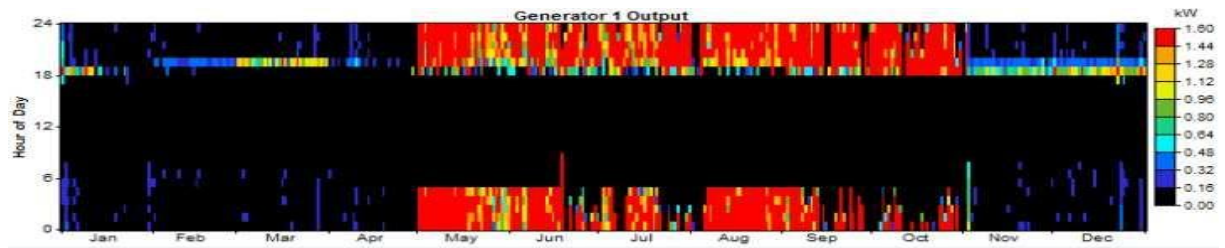
La production de l'énergie électrique commence après le lever du soleil à tout moment, entre (7 h et 9 h), en automne et en hiver, et entre (5h et 7h) en printemps et à l'été d'une très faible quantité d'environ (1.2 à 2.5kW) , Mais après ce temps, depuis (10h et 11h) elle augmente entre (4.2 et 7 kW), mais à midi elle atteint son sommet de (9.8 kW), Diminuant progressivement voire inexistante au coucher du soleil soit entre (16h à 17:30h) dans chacun des deux saisons : l'hiver et l'automne et entre (17h à 19h) en été et au printemps. Pour une durée totale de fonctionnement de 4379 h/an à un prix de 0,048 \$/kWh.



**Fig. IV 13 . La quantité d'énergie totale quotidienne produite par le PV pendant une année**

### IV.6.2.Pile à combustible

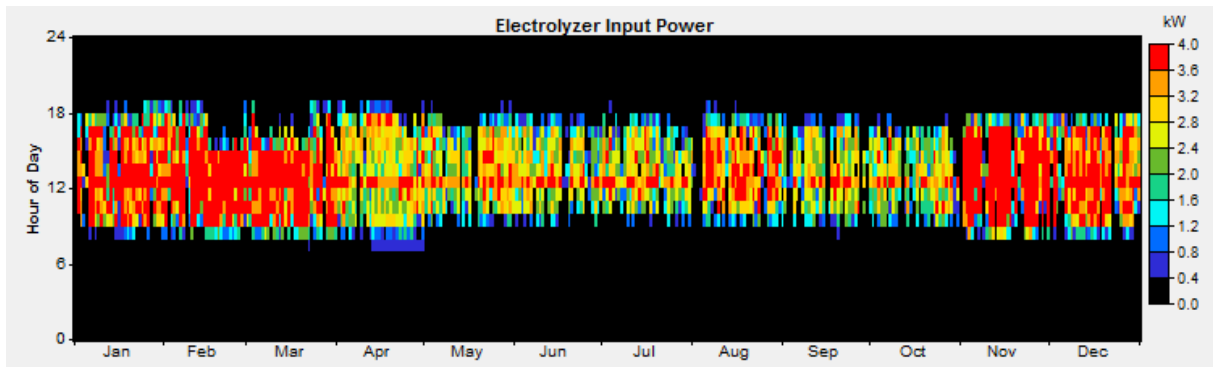
Dans le cas normale la pile produit l'énergie électrique dans la nuit (17:00h à 8:00h) en automne et en hiver ce production est faible 0.16 KW/ h par ce que la demande de charge est faible, dans l'été et au printemps la pile fonctionne (18:00 à 00:00h) et la production augmente elle varie entre 0.96 et 1.96 KW/h, la pile consomme 168 kg/ ans d'hydrogène avec à un prix de production électrique de 0,176 \$/kWh.



**Fig. IV 14.** La quantité d'énergie totale quotidienne produite par le PAC pendant une année

### IV.6.3.Elctrolyseur

On remarque que l'électrolyseur fonctionne tout la journée dans années la dure de fonctionnement 5543 h /ans et produit 0.019 kg/h avec total production hydrogène 168 kg/ ans.



**Fig. IV 15.** La tempe de fonctionnement de l'électrolyseur d'eau

### IV.6.4.Production mensuelle moyenne d'hydrogène

Pour assurer la continuité de fonctionnement de la pile à combustible , l'électrolyseur doit produire de l'hydrogene Toute l'année, la figure Fig.46 montre la Production journalière moyenne dans chaque mois .

Dans les premiers mois de l'année l'électrolyseur produit une valeur de 0.55 kg /j, puis ce valeur diminue à (0.32Kg/j) à cause de la consommation par la pile qui va diminuer dans les mois de juin et juillet ensuite dans le mois de novembre l'électrolyseur produit une valeur de 0.63 kg /j.

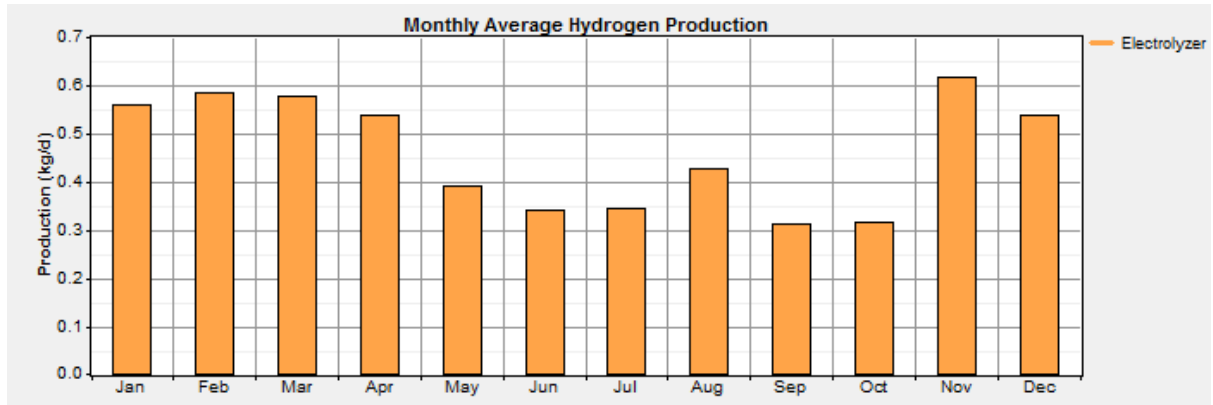


Fig .IV 16 . Résultat de production hydrogène pendant une année

### IV.7.Conclusion

Dans ce chapitre une brève description d'un système hybride de génération de l'énergie électrique et les principales notions liées au type d'architecture du système ont été aussi présentés, en suite nous avons expliqué est donné une vue d'ensemble sur le logiciel HOMER, qui permettant une compréhension idéale du fonctionnement du programme, l'objectif de l'utilisation de l'Homer est

la simulation et l'optimisation destiné à l'étude d'installation de production d'énergie avant le réalisation du système .

Nous avons fait une étude techno économique du système hybride PV / PAC par le logiciel Homer. Nous avons constaté qu'à partir des résultats de cette étude notre système hybride utilisé dans les régions de Laghouat à :

- Un cout initial de projet 39 930 \$ /59889500 DA
- le coût total net du système 52 028 \$ / 7804200 DA pour 25 ans.
- le coût production électrique 0.426\$/KWh 64 DA/KWh. On

Dans ce chapitre on a présenté les résultats de l'étude par HOMER, d'une installation PV-FC. Les inconvénients de l'installation d'un système PV-FC autonome est son coût élevé de la technologie photovoltaïque. Les faibles émissions des gaz à effet de serre est l'avantage le plus important de notre installation



# **Conclusion Générale**



## Conclusion Générale

---

Dans cette étude, nous avons effectué l'analyse technico-économique d'un système d'énergie renouvelable conçus pour alimenter un profil de charge (un bâtiment en site de Laghouat).

L'étude présentée dans ce mémoire concerne une application des plus actuelles des énergies renouvelables, celle de l'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque et l'hydrogène en hybride. Une meilleure rentabilité de ces systèmes à énergies renouvelables implique forcément un meilleur conditionnement, donc adaptation. Il s'agit de procéder à une étude conceptuelle d'un système de conditionnement de puissance pour un système hybride PV/Electrolyseur/PAC.

L'objectif étant de garantir l'efficacité énergétique de la chaîne de production, avec l'option du coût minimal. Cependant, le dispositif cohabite plusieurs disciplines de l'ingénierie fortement couplées électrochimie, thermodynamique et électrique...etc.

La démarche que nous avons menée pour établir notre étude est d'identifier les différents composant de notre système de les modalisés dans la première étape, puis dimensionner et simuler le système complet, a fin de prévoir des cas de figures divers de fonctionnement et l'optimisé.

Ces solutions exigent un dimensionnement laborieux préalable basé sur une connaissance approfondie du gisement en Energies Renouvelables du site d'implantation à l'amont. Nous avons fait appel au dimensionnement par logiciel Homer.

Dans cette étude nous avons pris en considération tous les coûts sur toute la durée de vie de projet. Ceux-ci incluent non seulement les coûts initial mais aussi les coûts de remplacement -le coût l'exploitation, d'entretien et d'installation.

Malgré que le prix du kWh soit élevé pour notre cas, notre système a plusieurs avantages qui sont :

- \_ Le système étudié permet d'alimenter d'une façon continue et autonome.
- \_ La durée de vie de des panneaux PV et de l'électrolyseur est estimé a **25 ans**
- \_ l'énergie utilisée est plus propres que les énergies fossiles

Bien que les techniques d'énergies renouvelables aient généralement un coût d'investissement supérieur à celui des énergies conventionnelles, ce qui induit des réactions stipulant leur non admissibilité, ce point de vue ignore totalement le coût d'exploitation et

## Conclusion Générale

---

d'entretien de tout système Énergétique. En effet, les techniques d'énergies renouvelables présentent un moindre coût d'exploitation.

Pour la poursuite de notre travail nous proposons comme des perspectives :

- L'évaluation de la gestion d'énergie au sein du système hybride et les phénomènes transitoires liés à la connexion de plusieurs composants électriques.
- L'insertion du coût de la surface d'installation du système dans l'étude technico-économique.
- Faire une étude du système hybride PV-EL-PAC pour les hôpitaux afin de profiter de la pile à combustible et électrolyseur pour produire l'oxygène et le hydrogène.



# **Références**

# **Bibliographie**



## Bibliographie

---

- [1] Benmesaoud mohamed Tarik "conception et optimisation d'un système associant Si-PV / Nafion-PEM pour application à générateur d'énergie verte. [USTO] ,2006.
- [2] Besquet sérvine " Etude d'un système autonome de production d'énergie couplant un champ photovoltaïque, électrolyseur et pile à combustible ".Mine de Paris [ENSMP], 2003.
- [3] Latrache.m et benhmid.a " Dimensionnement d'1 système photovoltaïque à traqueur solaire aveugle-sensible" [université de Laghouat] ,2007.
- [5] Wolfgang Friede " Modélisation et caractérisation d'une pile à combustible de type PEM " [Université de karlsruhe Grenoble] ,2003.
- [6] Thomas Mambrini. Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies. Météorologie. Université Paris Sud - Paris XI, 2014. Français. ffNNT : 2014PA112380ff. fftel-01164783
- [7] SYSTÈMES HYBRIDES À SOURCES D'ÉNERGIE RENOUVELABLES: HRES État de l'art – Modélisation - Optimisation -Conception – Étude de faisabilité – Simulation(Réalisation). Pr. A.Cherkaoui HRES G3EI3 2014-2015
- [8] C. Dumbs, « *Développement d'outils pour l'analyse des systèmes hybrides photovoltaïque diesel* », thèse de l'École des Mines de Paris, CEP, Sophia-Antipolis, soutenue en décembre 1999.
- [9] PV-GIS, photovoltaic-software.com consulté le 13/06/2022.10h 30 m
- [10] Abderrezzaq ,Bouharchouche, Conception et réalisation un logiciel de dimensionnement un système énergie hybride éolien-photovoltaïque. Revue des Energies Renouvelables Vol. 17 N°3 (2014) 359 – 376 September 2014.
- [11] Himadry Shekhar Das, Chee Wei Tan, A.H.M. Yatim, Kwan Yiew Lau «Feasibility analysis of hybrid photovoltaic/battery/fuel cell energy system for an indigenous residence in East Malaysia», 2017.
- [12] O. Gergaud, « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », thèse de l'École Normale Supérieure de Cachan, Systèmes et Applications des Technologies de l'Information et de l'Énergie, Antenne de Bretagne, soutenue en décembre 2002.
- [13] K.G.T Hollands, « *A derivation of the diffuse fraction's dependence on the clearness index* », Solar Energy, 35(2) : 131-136.
- [14] cours de mr. birane mouhoub system multi-source

## المخلص

في هذه المذكرة قمنا بمحاكاة النظام الهجين باستعمال برنامج الطاقة هومر. حيث يتكون النظام الهجين (الالواح الشمسية، خلايا الوقود، المحلل الكهربائي) مع بطاريات التخزين لتزويد مبنى إداري .  
و باخذ النتائج المقدمة من برنامج هومر لمنطقة الاغواط ، تحصلنا على تكلفة مشروع لمدة 25 سنة و تكلفة الطاقة(1كيلوات ساعي/دولار) و كذلك العدد الامثل و الخصائص لكل من (الالواح الشمسية، خلايا الوقود،المحلل الكهربائي) مع بطاريات التخزين .  
الكلمات المفتاحية: النظام الهجين، طاقة كهروضوئية، خلية الوقود الهيدروجينية، محلل كهربائي، هومر

## Abstract

In this work, we simulated hybrid system using HOMER logicel, which the hybrid system consists of (solar panels, fuel cells, electrolyser) works with storage batteries to supply the administrative building laghouat

From the results of the simulator HOMER for the laghouat region, we obtained a project cost of 25 years (US \$), energy cost (1 kWh / \$) and the optimum number and characteristics (solar panels, fuel cells, electrolysis) with storage batteries.

**Keys Words:** Renewable Energies, hybrid system, PV, Fuel cell, Electrolyser, HOMER Energy.

## Résumé

Dans ce travail, nous avons simulés système hybride à l'aide du logiciel HOMER, Le système hybride constitue (panneaux solaires, piles à combustible, électrolyseur) Fonctionnant avec des batteries d'accumulateurs pour alimenter le bâtiment administratif Laghouat.

D'après les résultats du logiciel HOMER pour la région de Laghouat , nous avons obtenu un coût de projet de 25 ans (US \$), un coût énergétique (1 kWh / \$), ainsi que le nombre optimale et les caractéristiques optimaux (panneaux solaires, piles à combustible, électrolyseur) avec stockage dans les batteries.

**Mots clés :** Énergie Renouvelable, système hybride, photovoltaïque, pile à combustible, Electrolyseur, HOMER Energie.