



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

Université de Ghardaïa

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الآلية والكهروميكانيك

Département de d'automatique et d'électromécanique

Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme

N° d'enregistrement

.../...../.....

Master

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Energies Renouvelables en Electrotechnique

Thème

Etude et conception d'un système hybride Pile à combustible groupe électrogène à gaz- Application à une Habitation

Présenté par :

LAOUAR Nesrine et ABDELALI Saliha

Soutenue publiquement le : 21/06/2023

Devant le jury composé de :

BAHRI Ahmed  
ABDELKARIM Thameur  
DJELLOULI Tahar  
TOUAFEK Khaled

Maitre de Conférences B  
Directeur de Recherche  
Maitre de Conférences B  
Directeur de Recherche

Université de Ghardaïa  
URAER- Ghardaïa  
Université de Ghardaïa  
URAER- Ghardaïa

**Président**  
**Examineur**  
**Examineur**  
**Encadreur**

Année universitaire 2022/2023

## Remerciements

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

﴿رَبِّ أَوْزَعْنِي أَنْ أَشْكُرَ نِعْمَتَكَ الَّتِي أَنْعَمْتَ عَلَيَّ وَعَلَىٰ وَالِدَيَّ وَأَنْ أَعْمَلَ صَالِحًا تَرْضَاهُ  
وَأَدْخِلْنِي بِرَحْمَتِكَ فِي عِبَادِكَ الصَّالِحِينَ﴾

« Avant de présenter ce travail, nous souhaitons exprimer notre gratitude envers notre Tout-Puissant Allah pour nous avoir accordé la patience et le courage dans la réalisation de ce mémoire. »

« En premier lieu, nous remercierons **Dr TOUAFEK Khaled**, Directeur de Recherche à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, Ghardaïa, en tant qu'encadreur de notre mémoire, d'avoir proposé un sujet très intéressant et pour ses conseils, sa disponibilité et pour nous avoir fait profiter de ses connaissances et de sa qualité tant professionnelle qu'humaine »

« On tient à remercier **Dr HACENE NACER** et **Dr BEKKAR BELGACEM** enseignants à l'université pour l'aide qu'ils nous ont fournis »

« Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à tous les **membres du jury** pour l'attention qu'ils ont portés à notre travail. »

« Nous souhaitons également exprimer notre gratitude envers le **Dr Djelloul DJAFER**, Directeur de l'Unité de Recherche Appliquée en Énergies Renouvelables (URAER, Ghardaïa), pour nous avoir permis de réaliser ce travail au sein de cette institution. »

## **DEDICACE**

Tout d'abord, je tiens à exprimer ma gratitude envers Dieu tout-puissant pour m'avoir accordé le courage et la patience nécessaires pour accomplir ce travail.

Je dédie ce modeste travail :

A mon défunt père, que Dieu lui fasse miséricorde, et à ma mère, que Dieu la protège et lui donne une longue vie, pour leur soutien moral et financier, leurs encouragements constants et les sacrifices qu'ils ont consentis.

A mes frères

A mes sœurs

A ma grande famille

A mes proches amies : FATIHA, MARWA, RAHIL, NESRINE. AMINE,  
KACEM.

A mon binôme NESRINE et toute la famille LAOUAR

À toutes les personnes qui m'ont apporté leur aide, que ce soit de près ou de loin, que ce soit par un simple mot d'encouragement ou de gentillesse.

À tous ceux qui occupent une place spéciale dans mon cœur et qui m'aiment.

A tous les enseignants du département d'automatique et d'électromécanique A  
Tous mes collègues étudiants de la promotion 2022/2023

**ABDELALI SALIHA**

## **DEDICACE**

Tout d'abord, je tiens à exprimer ma gratitude envers Dieu tout-puissant pour m'avoir accordé le courage et la patience nécessaires pour accomplir ce travail

Je dédie ce modeste travail :

À mes parents bien-aimés, que Dieu les préserve et les protège pour leur soutiens moral et financier, pour leurs encouragements constants et les sacrifices qu'ils ont consentis.

A mes frères

A mes sœurs

A mes grandes familles

A ma proche amie : SALIHA

A mon binôme SALIHA et toute la famille ABDELALI

Et un ami de soutien : EL MEGBED Abderrahmane

À toutes les personnes qui m'ont apporté leur aide, que ce soit de près ou de loin, que ce soit par un simple mot d'encouragement ou de gentillesse.

À tous ceux qui occupent une place spéciale dans mon cœur et qui m'aiment.

A tous les enseignants du département d'automatique et d'électromécanique A

Tous mes collègues étudiants de la promotion 2022/2023

**LAOUAR NESRINE**

## ملخص

يتكون هذا العمل من دراسة تصميم نظام هجين يجمع بين خلية وقود ومولد لتطبيق سكني. الهدف هو تطوير حل طاقة فعال وموثوق وصديق للبيئة لتلبية احتياجات الطاقة في المنزل. يوفر النظام الهجين تكامل خلية الوقود ومولد لزيادة كفاءة الطاقة مع ضمان استمرار إمداد الطاقة. تقوم خلية الوقود بتحويل الطاقة الكيميائية للهيدروجين مباشرة إلى كهرباء، بينما يستخدم مولد لتوليد الكهرباء. تحلل الدراسة احتياجات الطاقة لمنزل نموذجي وتحدد مواصفات النظام الهجين، بما في ذلك سعة خلية الوقود وإخراج مولد الغاز وقدرات تخزين الطاقة. يتم إجراء عمليات المحاكاة الحاسوبية لتقييم أداء النظام في ظل ظروف مختلفة، من أجل تحسين تصميمه وحجم المكونات بشكل صحيح.

**الكلمات المفتاحية:** خلية وقود، مولد، محاكاة، بيت، موقع معزول، قياس أبعاد

## Abstract

This work consists in studying a design of a hybrid system combining a fuel cell and generator for a residential application. The objective is to develop an efficient, reliable and environmentally friendly energy solution to meet the energy needs of a home. The hybrid system offers the integration of a fuel cell and generator to maximize energy efficiency while guaranteeing a continuous power supply. The fuel cell converts the chemical energy of hydrogen directly into electricity, while the generator uses to generate electricity. The study analyzes the energy needs of a typical home and determines hybrid system specifications, including fuel cell capacity, gas generator output and energy storage capabilities. Computer simulations are carried out to evaluate the performance of the system under different conditions, in order to optimize its design and correctly size the components.

**Keywords:** Fuel cell, Generator, Simulation, Housing, Isolated site, Dimensioning

## Résumé-

Ce travail consiste à étudier une conception d'un système hybride combinant une pile à combustible et un groupe électrogène pour une application résidentielle. L'objectif est de développer une solution énergétique efficace, fiable et respectueuse de l'environnement pour répondre aux besoins énergétiques d'une habitation. Le système hybride propose l'intégration d'une pile à combustible et d'un groupe électrogène pour maximiser l'efficacité énergétique tout en garantissant une alimentation électrique continue. La pile à combustible convertit directement l'énergie chimique de l'hydrogène en électricité, tandis que le groupe électrogène pour produire de l'électricité. L'étude analyse les besoins énergétiques d'une habitation typique et détermine les spécifications du système hybride, y compris la capacité de la pile à combustible, la puissance du groupe électrogène à gaz et les capacités de stockage d'énergie. Des simulations informatiques sont réalisées pour évaluer les performances du système dans différentes conditions, afin d'optimiser sa conception et de dimensionner correctement les composants.

**Mots clés:** Pile à combustible, Groupe électrogène, Simulation, Habitation, Site isolé, Dimensionnement

# Table des matières

<b>Remerciements</b> .....	i
<b>ملخص</b> .....	ii
<b>Résumé-</b> .....	ii
<b>Table des matières</b> .....	iii
<b>Liste des figures</b> .....	vii
<b>Liste des tableaux</b> .....	ix
<b>Liste de abréviations</b> .....	x
<b>Introduction Générale</b> .....	1
<b>CHAPITRE 1 : Généralités sur les énergies Renouvelables</b> .....	4
1.1 Introduction .....	5
1.2 Energie et ses Utilisations .....	5
<b>1.2.1 Définition de l'énergie</b> .....	5
<b>1.2.1.1 Problèmes concernant l'énergie</b> .....	5
<b>1.2.2 Utilisations de l'énergie</b> .....	5
1.3 Sources de l'énergie non renouvelables .....	6
<b>1.3.1 Energie fossile</b> .....	6
<b>1.3.1.1 Pétrole</b> .....	6
<b>1.3.1.2 Charbon</b> .....	6
<b>1.3.1.3 Gaz naturel</b> .....	7
<b>1.3.1.4 Energie nucléaire</b> .....	9
1.4 Energies Renouvelables .....	10
<b>1.4.1 Energie solaire</b> .....	10
<b>1.4.1.1 Solaire thermique</b> .....	11
<b>1.4.1.2 Solaire thermodynamique</b> .....	11
<b>1.4.1.3 L'énergie solaire photovoltaïque</b> .....	12
<b>1.4.2 Energie Eolienne</b> .....	15
<b>1.4.3 Energie hydraulique</b> .....	16

<b>1.4.4</b>	<b>Energie Biomasse</b> .....	17
<b>1.4.5</b>	<b>Energie Géothermie</b> .....	17
1.5	Les avantages des énergies renouvelables .....	18
1.6	Inconvénients des énergies renouvelables .....	19
1.7	Les énergies renouvelables en Algérie .....	20
1.8	Conclusion .....	20
<b>Chapitre 2 : Etat de l'art sur les piles à combustibles et les groupes électrogène</b> .....		<b>21</b>
2.1	Introduction .....	22
2.2	Définition des piles à combustible .....	22
2.2.1	Composants piles à combustible .....	23
•	<b>Anode</b> .....	23
•	<b>Cathode</b> .....	23
•	<b>Catalyseur</b> .....	23
•	<b>L'électrolyte</b> .....	24
2.2.2	Principe de fonctionnement .....	24
2.2.3	La production de dihydrogène .....	25
<b>2.2.3.1</b>	<b>Les différents types de production et applications</b> .....	<b>26</b>
2.2.4	Avantages et inconvénients de la pile à combustible .....	26
2.2.5	Différents types des piles à combustible .....	27
<b>2.2.5.1</b>	<b>Pile alcaline (AFC)</b> .....	<b>27</b>
<b>2.2.5.2</b>	<b>Pile à membrane à électrolyte polymère (PEMFC)</b> .....	<b>28</b>
<b>2.2.5.3</b>	<b>Pile à méthanol direct (DMFC)</b> .....	<b>28</b>
<b>2.2.5.4</b>	<b>Pile à acide phosphorique (PAFC)</b> .....	<b>28</b>
<b>2.2.5.5</b>	<b>Pile à carbonate fondu (MCFC)</b> .....	<b>29</b>
<b>2.2.5.6</b>	<b>Pile à oxyde solide (SOFC)</b> .....	<b>29</b>
2.2.6	Rendements de fonctionnement des PAC .....	31

<b>2.2.6.1</b>	<b>Rendement thermodynamique</b> .....	31
<b>2.2.6.2</b>	<b>Rendement de matière</b> .....	31
<b>2.2.6.3</b>	<b>Rendement voltaïque</b> .....	31
<b>2.2.6.4</b>	<b>Rendement global</b> .....	31
2.2.7	Caractéristiques de technologie des piles à combustible.....	32
2.2.8	Domain d'application .....	33
2.3	groupe électrogène .....	34
2.3.1	Principe de fonctionnement .....	35
2.3.2	Constitution d'un groupe électrogène .....	35
2.3.3	Différents types des groupes électrogènes .....	36
2.3.6	Le synchroscope.....	40
2.3.7	La capacité d'énergie du groupe électrogène.....	40
<b>Chapitre 3 Etude et modélisation du système hybride Pile à combustible- groupe électrogène à gaz</b> .....		<b>42</b>
3.1	Introduction .....	43
3.2	Les systèmes hybrides.....	43
3.3	Avantages et inconvénients d'un système hybride .....	45
3.4	Les convertisseurs statiques .....	45
3.5	Topologies des systèmes électriques hybrides .....	46
<b>3.5.1</b>	<b>Architecture à bus à CC</b> .....	<b>47</b>
<b>3.5.2</b>	<b>Architecture mixte à bus à CC/CA</b> .....	<b>47</b>
3.6	Etude du système hybride pile à combustible - groupes électrogènes.....	48
3.7	Modélisation de la pile à combustible.....	50
<b>3.7.1</b>	<b>Le modèle statique</b> .....	<b>50</b>
3.8	Modélisation du groupe électrogène .....	52
3.9	Modélisation du système hybride .....	56

3.10 Conclusion.....	57
<b>CHAPITRE 4: Simulation du système hybride PAC et GE.....</b>	<b>58</b>
4.1 Introduction .....	59
4.2 Outil de simulation.....	59
4.3 Connexion des sources du système hybride .....	59
4.4 Schéma Simulink pour la PAC.....	62
4.5 Résultats de simulation .....	62
4.6 Schéma Simulink pour la GE .....	65
4.7 Résultats de simulation .....	65
4.8 Conclusion.....	66
<b>CHAPITRE 5 : Application du système hybride PAC et GE à une Habitation .....</b>	<b>67</b>
5.1 Introduction .....	68
5.2 Les ressources météorologiques .....	68
<b>5.2.1 Situation géographique de l’habitation .....</b>	<b>68</b>
<b>5.2.2 Besoins énergétiques journaliers de la maison.....</b>	<b>68</b>
<b>5.2.3 Le profil de charge .....</b>	<b>69</b>
<b>5.2.4 Profil de consommation utilisé dans notre étude d’une habitation .....</b>	<b>71</b>
<b>5.2.4.1 Profil de consommation hivernal .....</b>	<b>71</b>
<b>5.2.4.2 Profil de consommation estival.....</b>	<b>72</b>
<b>5.2.4.3 Profil de consommation moyenne .....</b>	<b>72</b>
<b>5.2.5 Profil de consommation énergétique horaire d’une habitation.....</b>	<b>73</b>
<b>5.2.6 Dimensionnement de système hybride .....</b>	<b>75</b>
5.3 Conclusion.....	81
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>82</b>
<b>Bibliographies .....</b>	<b>84</b>

## Liste des figures

<b>Figure 1.1:</b> Pétrole.....	6
<b>Figure 1.2:</b> Le charbon. ....	7
<b>Figure 1.3:</b> Centrales nucléaires .....	9
<b>Figure 1.4:</b> Applications de l'énergie solaire .....	10
<b>Figure 1.5:</b> l'énergie solaire thermique .....	11
<b>Figure 1.6:</b> L'énergie solaire thermodynamique .....	12
<b>Figure 1.7:</b> L'énergie solaire thermodynamique .....	12
<b>Figure 1.8:</b> Cellule monocristallins.....	13
<b>Figure 1.9:</b> Cellule poly cristallin. ....	14
<b>Figure 1.10:</b> Cellule amorphes.....	14
<b>Figure 1.11:</b> Eolienne à axe vertical (a) et axe horizontal (b). ....	16
<b>Figure 1.12:</b> Energie hydraulique .....	16
<b>Figure 1.13:</b> Energie Biomasse.....	17
<b>Figure 1.14:</b> Energie Géothermie .....	18
<b>Figure 2.1:</b> Principe de fonctionnement d'une pile à combustible. ....	25
<b>Figure 2.2:</b> Influence de la polarisation sur la tension. ....	33
<b>Figure 2.3:</b> Domaines d'application des piles à combustible .....	33
<b>Figure 2.4:</b> Groupe électrogène. ....	35
<b>Figure 2.5:</b> Groupe électrogène diesel kohler.....	36
<b>Figure 2.6:</b> groupe électrogène essence. ....	37
<b>Figure 2.8:</b> groupe électrogène a Gaz .....	37
<b>Figure 2.9:</b> principe de transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique. ....	39

<b>Figure 3.1:</b> exemple d'un système électrique hybride. ....	44
<b>Figure 3.2:</b> Configuration du SEH à bus CC. ....	47
<b>Figure 3.3:</b> Configuration du SEH à deux bus à CC et à CA .....	48
<b>Figure 3.4:</b> Schéma synoptique du système hybride pile à combustible - groupes électrogènes.....	49
<b>Figure 3.5:</b> Caractéristique statique de pile PEM. ....	50
<b>Figure 3.6:</b> Représentation électrique d'une pile à combustible. ....	51
<b>Figure 3.7:</b> Représentation d'une machine synchrone dans les repères triphasé (abc) et diphasé (dq).....	54
<b>Figure 3.8:</b> modélisation de système hybride pile à combustible - groupes électrogènes. ....	56
<b>Figure 4.1:</b> Schéma de commande de contrôle.....	60
<b>Figure 4.2:</b> Schéma de connexion de PAC aux éléments: batteries, DG, .....	61
<b>Figure 4.3:</b> : Schéma Simulation de PAC .....	62
<b>Figure 4.4:</b> Caractéristique Tension /Densité de Courant .....	63
<b>Figure 4.5:</b> Caractéristique Densité de puissance /Densité de Courant .....	63
<b>Figure 4.6:</b> Caractéristique Début de hydrogène/Densité de Courant .....	64
<b>Figure 4.7:</b> Schéma Simulation de GE.....	65
<b>Figure 4.8:</b> Schéma Simulation de GE.....	65
<b>Figure 5.1:</b> le plan du Maison. ....	69
<b>Figure 5.2:</b> Courbes de profils de charge horaires d'une habitation .....	74
<b>Figure 5.3:</b> Courbes de profils de charge horaires d'une habitation .....	74
<b>Figure 5.4:</b> Courbes de profils de charge horaires d'une habitation modéré.....	75
<b>Figure 5.5:</b> Courbes de profils de charge annuelle d'une habitation .....	79
<b>Figure 5.6:</b> Profil de consommation annuelle d'hydrogène. ....	79

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1.1:</b> Rendement des différentes technologies.....	15
<b>Tableau 2.1:</b> Réactions électrochimiques de chaque technologie de piles à combustible. ....	29
<b>Tablea 2.2:</b> Différents types de piles à combustible. ....	29
<b>Tableau 5.1:</b> profil de consommation hivernal.....	71
<b>Tableau 5.2:</b> profil de charge estival.....	72
<b>Tableau 5.3: profil de charge moyenne.</b> ....	72
<b>Tableau 5.4:</b> Profil de consommation horaire d'une habitation. ....	73
<b>Tableau 5.5:</b> Profil de consommation annuelle d'une habitation. ....	78

## Liste de abréviations

Symbole	Description	Unité
PAC	pile à combustible	[-]
FC	Fuel Cell	[-]
GE	Groupe électrogène	[-]
H <sub>2</sub>	Hydrogène	[-]
H <sup>+</sup>	Protons d'hydrogène	[-]
H <sub>2</sub> O	Eau	[-]
O <sub>2</sub>	Oxygène	[-]
e <sup>-</sup>	Électrode	[-]
CH <sub>4</sub>	Méthane	[-]
CO <sub>2</sub>	dioxyde de carbone	[-]
AFC	Alkaline Fuel Cell	[-]
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell	[-]
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell	[-]
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell	[-]
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell	[-]
SOFC	Solid Oxid Fuel Cell	[-]
KOH	Hydroxyde de potassium	[-]
GPL	Gaz de Pétrole Liquéfié	[-]
SEH	Système Electrique Hybride	[-]
MSRB	Machine Synchrone à Rotor Bobiné	[-]
MSAP	Machine Synchrone à Aimant Permanent	[-]
MS	Machine Synchrone	[-]
Zr <sub>2</sub>	Zircon	[-]
Y <sup>3+</sup>	Ytterbium	[-]
LiAlO <sub>2</sub>	Lithium Aluminate	[-]
H	Rendement	%
ΔG	Variation de l'énergie libre de Gibbs	kJ/mol
ΔH	Variation de l'enthalpie	kJ/mol
V	Tension	V
E	Potentiel électrochimique	V
E	tension déclenchée	V
L	Nombre de boucles	[-]
Di	Variation du flux magnétique	[-]
Dt	Variation temporelle	[-]
Pm	Puissance mécanique	W
S	Puissance apparente	VA
v <sub>s</sub>	Tension Statorique	V
I <sub>s</sub>	Courant Statorique	A
R <sub>s</sub>	Résistance Statorique	Ω
φ <sub>s</sub>	Flux Statorique	[-]

$L_S$	Inductance du Stator	H
$V_{PAC}$	Tension réelle d'une pile unitaire	V
$E$	la tension théorique à vide	V
$V_{act}$	Pertes d'activation	V
$V_{ohm}$	Pertes ohmiques	V
$V_{conc}$	Pertes de concentration	V
$I_{FC}$	courant délivré par la pile à combustible	A
$i_0$	le courant d'échange caractérisant à vide les échanges électrode-électrolyte	A
$i_n$	courant interne permettant de tenir compte d'une éventuelle traversée de gaz et/ou d'électrons à travers l'électrolyte	A
$A$	pende de la droite de Tafel	[-]
$R_m$	résistance totale de la pile à combustible	$\Omega$
$B$	Constante de transport ou de transfert de masse	[-]
$i_L$	courant limite	A
$I_f$	Courant d'excitation continu	A
$J$	Moment d'inertie de la partie tournante	kg.m
$C_r$	Couple résistant	N.m
$K_f$	Coefficient de frottement visqueux	N.m.s/rad
$\Omega$	Vitesse mécanique	rad/s
$C_{em}$	Le couple électromagnétique	N.m.k8

# **Introduction Générale**

## **Introduction Générale**

Le développement des énergies renouvelables est un enjeu crucial du 21<sup>ème</sup> siècle, à la fois pour lutter contre le réchauffement climatique et pour trouver des alternatives aux énergies fossiles. Actuellement, la production mondiale d'énergie dépend essentiellement des combustibles fossiles tels que le pétrole, le charbon et le gaz naturel. Cependant, la croissance de la population mondiale ainsi que le développement économique devraient entraîner une augmentation des besoins énergétiques à l'échelle mondiale. Selon l'Agence Internationale de l'Energie, plus de 1,4 milliard de personnes dans le monde n'ont pas accès à l'électricité, dont environ 85% vivent dans les zones rurales. Ces régions sont également confrontées à des défis environnementaux et économiques majeurs, ce qui rend la mise en place de solutions énergétiques durables particulièrement importante pour ces régions. Dans ce contexte, le recours accru aux sources d'énergie renouvelables (SER) est une solution essentielle pour répondre aux besoins énergétiques tout en préservant l'environnement.

La promotion des énergies renouvelables comme alternative écologique aux combustibles fossiles et à l'énergie nucléaire est une solution très attrayante car elles ne s'épuisent jamais, sont non polluantes et conviennent parfaitement à la production décentralisée. Leur utilisation pour la production d'électricité est très rentable dans les zones isolées où l'extension du réseau électrique est un échec financier

Comme toutes les sources d'énergie renouvelable, elles ont également leurs inconvénients : premièrement, il y a un coût relativement élevé pour les installations nécessaires, qui devraient durer des années. En fait,

Dans ce travail, nous avons étudié un système hybride et l'avons appliqué à une charge. Selon la définition, un système hybride est un mélange de deux sources d'énergie au minimum. L'objectif principal de cette étude est d'appliquer le système hybride sur une charge autonome en utilisant à la fois des piles à combustible, des générateurs et des batteries pour stocker et transporter de l'énergie au besoin. Pour ce faire, notre travail sera structuré de la manière suivante :

- ✚ Le premier chapitre donnera un aperçu général des énergies renouvelables et non renouvelables, ainsi que de leurs avantages et inconvénients.

## *Introduction Générale*

---

- ✚ Dans le deuxième chapitre seront technologiques dans les piles à combustible et les groupe électrogène, avec une description de leurs types, avantages, inconvénients et principes de fonctionnement.
- ✚ Le troisième chapitre sera consacré à l'étude et la modélisation du système hybride (pile à combustible et générateur à gaz).
- ✚ Nous présenterons dans le quatrième chapitre la simulation des parties du système hybride et les résultats ont été présentés et discutés.
- ✚ Dans le cinquième et dernier chapitre, nous allons dimensionner la pile à combustible et le générateur à gaz pour une maison isolée.

Une conclusion générale termine ce mémoire.

# **CHAPITRE 1**

## **Généralités sur les énergies Renouvelables**

# CHAPITRE 1

## Généralités sur les énergies Renouvelables

### 1.1 Introduction

L'énergie est essentielle à l'homme. L'énergie est un enjeu majeur dans les domaines politiques, économiques, scientifiques et environnementaux. L'homme a toujours eu besoin d'énergie pour se nourrir et se déplacer. Aujourd'hui, grâce à la technologie, nous pouvons produire de grandes quantités d'énergie en utilisant diverses ressources. Au XXI<sup>e</sup> siècle, l'énergie reste un enjeu crucial [1]

Dans ce chapitre, nous affirant une brève présentation des différentes énergies non renouvelables et renouvelables. Les sources d'énergie renouvelables sont nombreuses et diversifiées.

### 1.2 Energie et ses Utilisations

#### 1.2.1 Définition de l'énergie

L'énergie est une quantité physique qui peut exister sous différentes formes, telles que l'énergie électrique, mécanique, chimique et alimentaire. L'énergie peut être transformée d'une forme à une autre, mais chaque conversion s'accompagne inévitablement d'une perte d'énergie, conformément au principe de Carnot. [2]

##### 1.2.1.1 Problèmes concernant l'énergie

- Emissions découlant de la production d'énergie à partir de sources d'énergie non renouvelables telles que les combustibles fossiles.
- Réchauffement climatique.
- Pollution d'air et de l'eau.
- L'effet de serre.

##### 1.2.2 Utilisations de l'énergie

L'énergie est utilisée pour le transport, pour l'usage industriel, le Secteur résidentiel, l'agriculture.

### **1.3 Sources de l'énergie non renouvelables**

C'est l'énergie conventionnelle ou l'énergie qui est épuisée et comprend le charbon, le pétrole, le gaz naturel et les produits chimiques, c'est-à-dire une énergie qui ne peut pas être reconstruite ou compensée rapidement [3].

#### **1.3.1 Energie fossile**

Les énergies fossiles sont principalement constituées de pétrole, de gaz naturel, de charbon et nucléaire. Elles sont les sources d'énergie les plus couramment utilisées dans le monde, représentant plus de 80 % de l'énergie consommée. Contrairement à d'autres formes d'énergie, ils sont non renouvelables [4].

##### **1.3.1.1 Pétrole**

Les hydrocarbures resteront indispensables à court et moyen termes pour les transports et la pétrochimie, représentant environ deux tiers de la demande énergétique mondiale d'ici 2030. Cependant, il est important de prendre en compte le caractère fini des ressources en hydrocarbures et la problématique du changement climatique lors du développement de solutions énergétiques et de mobilité. Les hydrocarbures joueront toujours un rôle important dans l'avenir, mais l'innovation technologique sera essentielle pour repousser les limites de leur utilisation et développer des alternatives [5].



**Figure 1.1: Pétrole.**

##### **1.3.1.2 Charbon**

Le charbon est la source d'énergie fossile la plus abondante et la mieux répartie dans le monde [6] et c'est une matière combustible qui provient de résidus fossilisés de forêts. Lentement elles se

sont transformées en charbon. Lorsque le charbon a été découvert, l'homme l'a utilisé pour le chauffage des maisons, l'alimentation des machines dans les usines et la propulsion des trains. Aujourd'hui on s'en sert encore pour produire de l'électricité, mais lorsqu'il brûle il émet beaucoup de CO<sup>2</sup>. [7]. La consommation mondiale de charbon a connu une progression annuelle moyenne de +4.3%. Différents types de charbon (anthracite, houille, lignite, tourbe) ont des niveaux de pouvoir énergétique variés. Le charbon était autrefois la principale source d'énergie fossile, mais il a été remplacé par le pétrole au fil du temps. Malgré cela, le charbon conserve une présence significative dans l'industrie énergétique actuelle. 26% de la consommation mondiale d'énergie primaire dans le monde. [7].

Le charbon est une source d'énergie fossile non renouvelable qui génère une importante émission de CO<sup>2</sup>, contribuant ainsi de manière significative à la pollution et à l'accélération du réchauffement climatique. [8]



**Figure 1.2:** Le charbon.

### **1.3.1.3 Gaz naturel**

Le gaz naturel joue un rôle essentiel dans l'approvisionnement énergétique et devrait continuer à jouer un rôle important dans le mix énergétique de l'avenir. Il présente des avantages environnementaux précieux par rapport aux autres énergies fossiles, ainsi que des réserves

importantes. Depuis les années 70, la part du gaz naturel dans le bilan énergétique mondial ne cesse d'augmenter régulièrement. La dimension géostratégique du gaz naturel est en expansion, avec des échanges qui dépassent de plus en plus le cadre régional pour s'internationaliser progressivement. La sécurisation des approvisionnements devient donc un enjeu majeur pour les pays dépendant de son importation. Bien qu'il ne puisse pas se substituer massivement au pétrole, notamment dans les transports, le gaz naturel jouera un rôle important dans le mix énergétique de l'avenir.

Le gaz naturel est une ressource limitée, dont les réserves sont principalement localisées dans des zones géographiques spécifiques. L'amélioration des conditions d'approvisionnement, de transport et de stockage joue un rôle stratégique pour son avenir dans le mix énergétique. Actuellement, le gaz représente plus de 20 % de la consommation énergétique mondiale, contre 40 % pour le pétrole. Au cours des dix dernières années, la demande mondiale de gaz naturel a augmenté en moyenne de 2,5 % par an, ce qui est une croissance plus rapide que celle de l'énergie en général (2 %) et en particulier du pétrole (1,7 %). Cette croissance de la consommation de gaz est largement liée à son développement dans le secteur de l'électricité. Selon l'Agence Internationale de l'Énergie, la consommation de gaz devrait doubler d'ici 2030.

Dans le domaine de la production d'électricité, le charbon, qui représente actuellement 40 % de la part, concurrence directement le gaz naturel. Au niveau mondial, la part du gaz utilisée comme matière première est très faible (4 %) par rapport à son utilisation industrielle (25 %). Au cours des dix dernières années, le secteur de l'électricité est devenu le principal moteur de l'augmentation de l'utilisation du gaz naturel dans le monde, une tendance qui devrait se poursuivre. D'ici 2020, le secteur de l'électricité devrait absorber environ 35 % de la consommation annuelle de gaz commercialisé, contre 30 % aujourd'hui, avec une forte demande provenant des pays émergents.

Le gaz naturel présente un bilan environnemental très favorable dans la production d'électricité. Les émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) associées à son utilisation sont réduites de moitié par rapport aux centrales à charbon les plus efficaces. Le développement des centrales à gaz à cycle combiné, qui améliorent l'efficacité énergétique des centrales, contribue grandement à l'augmentation de l'utilisation du gaz dans le secteur de l'électricité. [5]

### 1.3.1.4 Energie nucléaire

Les énergies fossiles s'épuisent plus rapidement qu'elles ne se renouvellent naturellement. Les gisements connus de ces énergies sont voués à disparaître plus ou moins rapidement. L'énergie nucléaire produite par fission est un cas particulier : les gisements exploitables connus seront épuisés dans un délai estimé de 50 ans à un siècle, en fonction du développement de la consommation des pays orientaux (notamment en tenant compte des futures centrales qui seront construites en Chine et en Inde), ce qui la classe dans la catégorie des "non renouvelables".

Les réacteurs actuellement en fonctionnement sont principalement des réacteurs à eau légère de deuxième génération, qui peuvent être approvisionnés en combustible sans difficulté, tout comme les réacteurs de troisième génération. Les réserves connues d'uranium classique représentent environ 70 ans de consommation actuelle, et les réserves supplémentaires probables permettent une production d'électricité pendant environ 100 ans de plus. Les réacteurs de quatrième génération, qui devraient être mis en service vers 2040, permettront d'augmenter la durée de vie de plusieurs milliers d'années. [8]

L'énergie nucléaire peut être employée afin de générer de l'électricité

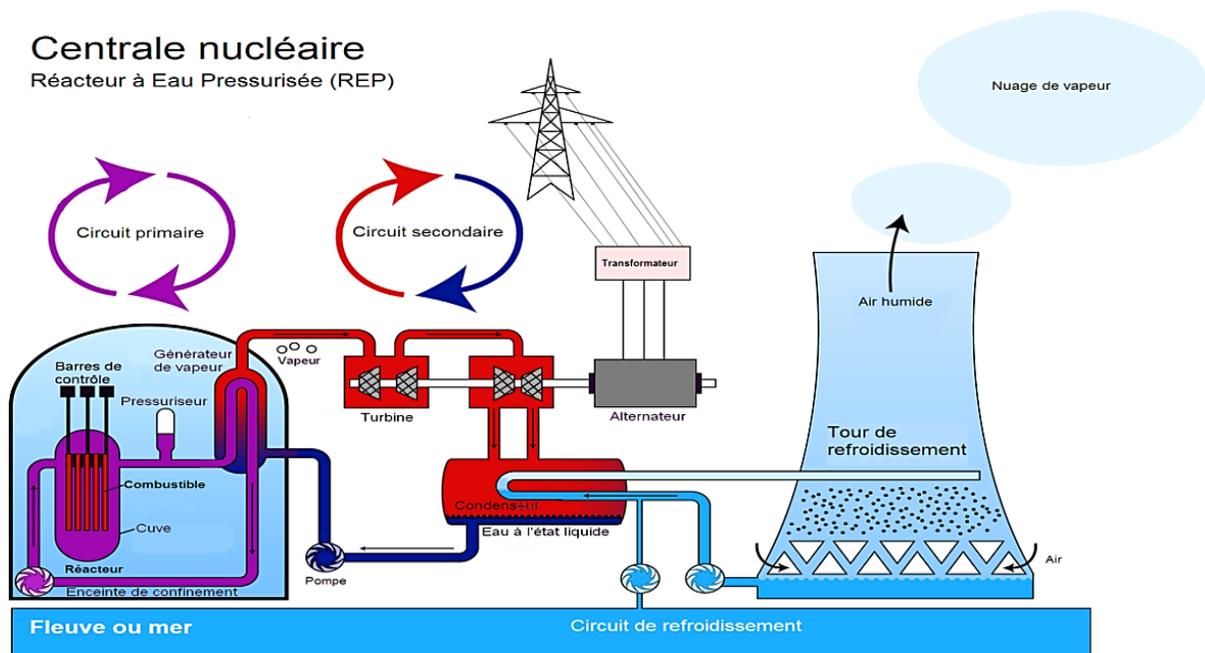


Figure 1.3: Centrales nucléaires

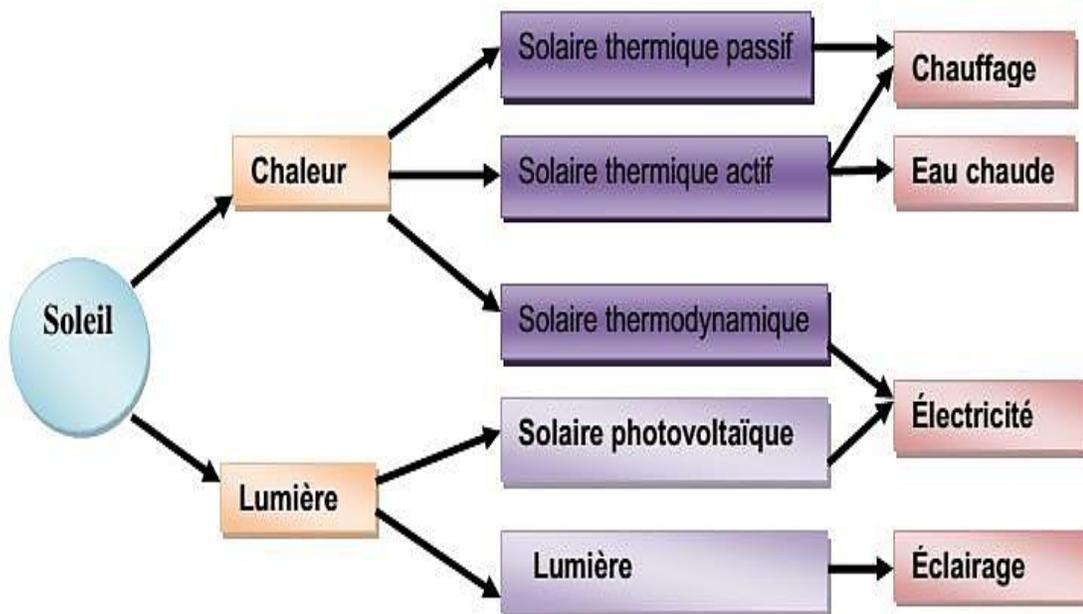
## 1.4 Energies Renouvelables

Les énergies renouvelables sont des formes d'énergie naturellement régénérables. Il existe cinq principales catégories d'énergies renouvelables. En termes d'exploitation actuelle, elles se classent comme suit :

- L'énergie solaire
- L'énergie éolienne
- L'énergie hydraulique (hydroélectricité)
- La biomasse (avec le bois de chauffage, ainsi que biogaz...)
- La géothermie. [9]

### 1.4.1 Energie solaire

Plusieurs méthodes sont utilisées pour produire et utiliser l'énergie solaire (Figure 1.4), notamment le solaire thermique (passif ou actif), le solaire thermodynamique, le solaire photovoltaïque et l'éclairage naturel.

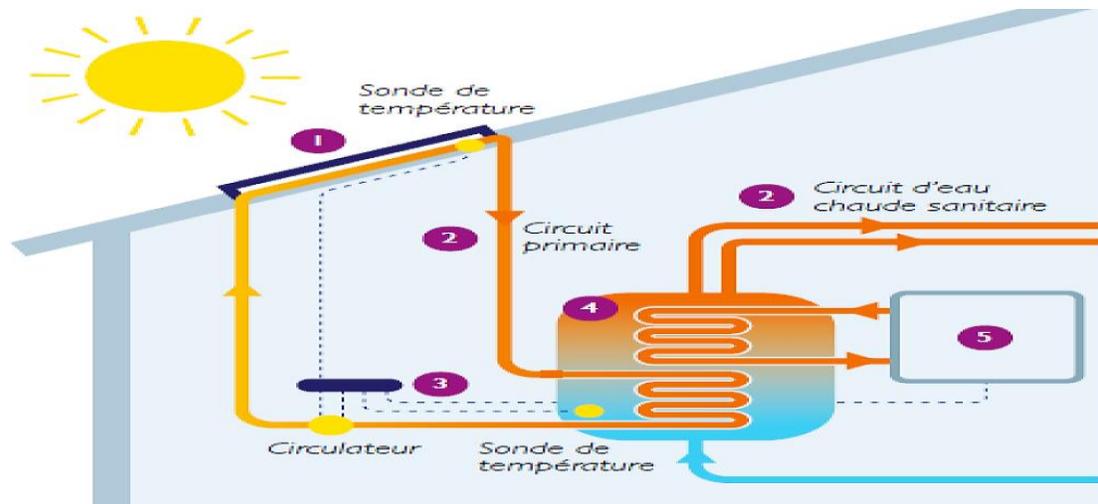


**Figure 1.4:** Applications de l'énergie solaire

### **1.4.1.1 Solaire thermique**

Le principe de l'énergie thermique repose sur la conversion du rayonnement solaire en énergie thermique en faisant circuler un fluide à travers des panneaux exposés au soleil (Figure 1.5), La conversion d'énergie thermique peut être directe lorsqu'elle est utilisée spécifiquement pour le chauffage de l'eau sanitaire.

Cependant, si l'objectif est de produire de l'électricité, il sera nécessaire d'utiliser des générateurs qui convertissent l'énergie thermique en électricité générée (comme les moteurs à air chaud, par exemple). L'énergie thermique utilise la chaleur provenant du rayonnement solaire pour chauffer les bâtiments ou l'eau sanitaire. Pour cette dernière il est intéressant de savoir que dans certains pays le chauffage d'eau sanitaire représente environ 20% des dépenses énergétiques d'un foyer et que l'énergie solaire thermique peut subvenir à environ 80% de cette dépense énergétique [10].



**Figure 1.5:** l'énergie solaire thermique

### **1.4.1.2 Solaire thermodynamique**

L'énergie solaire thermodynamique est une méthode de production d'électricité qui permet également de stocker de l'énergie thermique pendant plusieurs heures après le coucher du soleil dans des centrales solaires à concentration. Le processus consiste à concentrer la lumière solaire à l'aide de miroirs pour chauffer un fluide à haute température (plusieurs centaines de degrés), produisant ainsi de la vapeur par échange thermique. Cette vapeur actionne ensuite une turbine qui

produit de l'électricité. Le fluide utilisé peut maintenir sa température pendant plusieurs heures après le coucher du soleil, ce qui permet de produire de l'électricité en début de soirée, lorsque la consommation est la plus élevée. [12]



**Figure 1.6:** L'énergie solaire thermodynamique

### **1.4.1.3 L'énergie solaire photovoltaïque**

La production d'énergie photovoltaïque repose sur l'effet photoélectrique qui permet de générer un courant électrique continu à partir d'un rayonnement électromagnétique. Les cellules photovoltaïques sont utilisées pour capter cette énergie et plusieurs d'entre elles peuvent être combinées pour former un module ou un panneau photovoltaïque. Pour constituer une installation photovoltaïque, plusieurs panneaux sont généralement reliés entre eux pour former un générateur photovoltaïque. Il existe diverses technologies de panneaux solaires photovoltaïques : [7]



**Figure 1.7:** L'énergie solaire thermodynamique

**a. Modules solaires monocristallins**

Des blocs de silicium sont fabriqués à partir de fonte de silicium ultra pur. Les monocristaux sont caractérisés par un agencement uniforme du réseau cristallin dans leur structure. Le silicium est coupé en rondelles de 200 à 300  $\mu\text{m}$  d'épaisseur, appelées galettes (wafers), pour être utilisé dans la fabrication de modules solaires. Afin d'optimiser l'utilisation de la surface du module solaire, les cellules rondes sont découpées en éléments carrés, généralement avec une longueur d'arête de 152 mm. La fabrication des cellules monocristallines comprend des étapes telles que le dopage, l'application de surfaces de contact et d'une couche anti-réflexion. Avec un rendement variant entre 15 et 18 %, les cellules monocristallines fabriquées industriellement sont connues pour avoir le rendement le plus élevé. Cependant, leur fabrication requiert plus d'énergie et de temps que celle des cellules poly cristallines. [11]



**Figure 1.8:** Cellule monocristallins.

**b. Cellules poly cristallines**

Pour la fabrication de cellules solaires polycristallines, le matériau de base est du silicium ultra pur qui est fondu. Cependant, au lieu de cultiver des monocristaux, la fonte de silicium est refroidie de manière contrôlée dans un moule carré. Pendant le refroidissement, les cristaux s'orientent de manière irrégulière, ce qui donne à la surface des cellules solaires polycristallines son aspect miroitant caractéristique. Les blocs de silicium refroidis sont ensuite découpés en galettes de 200 à 300  $\mu\text{m}$  d'épaisseur. La fabrication des cellules solaires polycristallines comprend également des étapes de dopage, d'application des surfaces de contact et d'une couche anti-réflexion. La couche

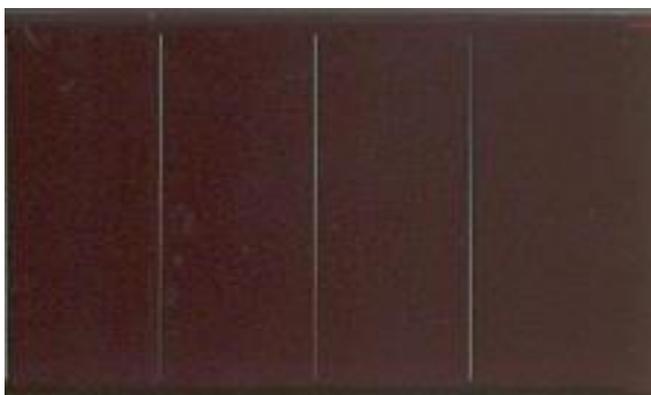
anti-réflexion confère à la cellule solaire sa surface bleue typique, car le bleu est la couleur qui réfléchit le moins de lumière et en absorbe la plus grande quantité. Les cellules solaires polycristallines présentent un rendement compris entre 13 et 16%. [17]



**Figure 1.9:** Cellule poly cristallin.

### **c. Modules solaires amorphes**

Les matériaux amorphes sont ceux dont les atomes n'ont pas une structure régulière, contrairement aux cristaux qui ont une structure ordonnée. Les cellules solaires amorphes sont fabriquées en appliquant du silicium sur un matériau de support, tel que le verre. L'épaisseur du silicium utilisé est d'environ 0,5 à 2  $\mu\text{m}$ . Cette méthode permet d'économiser la quantité de silicium nécessaire et évite la nécessité de découper des blocs de silicium. Cependant, les cellules solaires amorphes ont un rendement relativement faible, généralement compris entre 6 et 8%. [17]



**Figure 1.10:** Cellule amorphes.

**Tableau 1.1:** Rendement des différentes technologies [17]

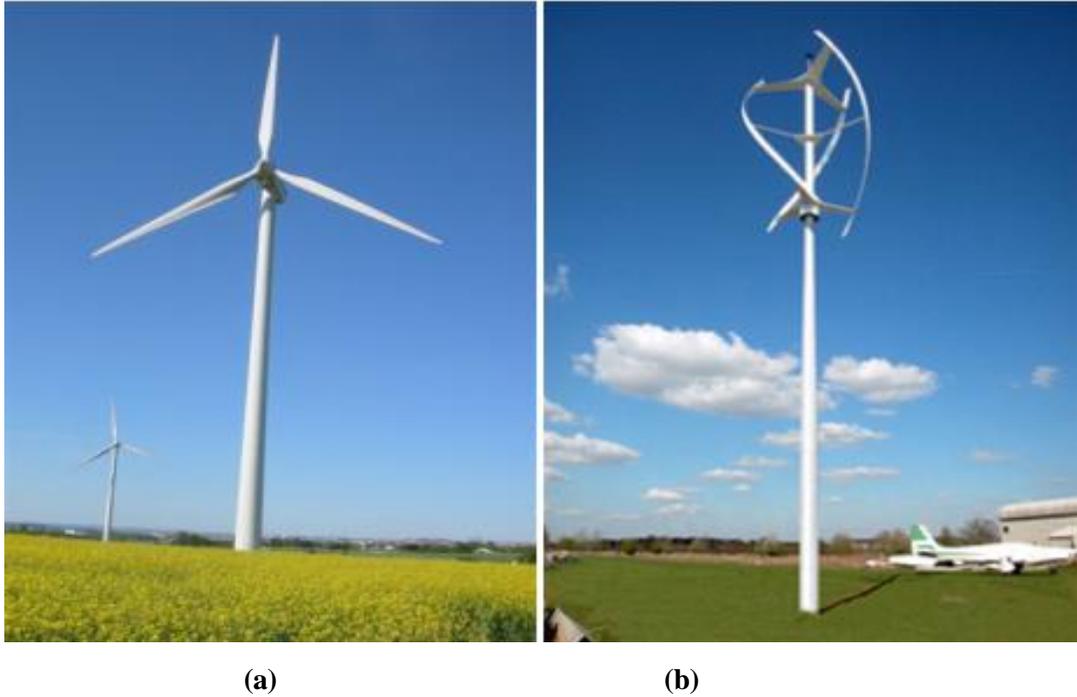
Matériau de base	Rendement en %	Surface en $m^2$
Cellule monocristalline	15-18	7-9
Cellule poly cristalline	13-16	8-9
Cellule amorphe	6-8	13-20

### 1.4.2 Energie Eolienne

L'éolienne utilise l'énergie cinétique du vent pour faire tourner son rotor. Cette énergie cinétique est transformée en énergie mécanique, qui est ensuite convertie en énergie électrique par une génératrice électromagnétique située sur le même axe que le rotor. L'électricité ainsi produite peut-être envoyée dans le réseau de distribution, stockée dans des accumulateurs ou utilisée directement par des charges isolées.

- Les éoliennes tirent parti du mouvement de l'air pour générer de l'énergie, en convertissant l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique ou électrique.
- L'énergie éolienne est une source d'énergie durable et non polluante.
- Le vent tourne les pales de l'hélice qui a leurs tours font tourner l'arbre d'une génératrice produisant de l'électricité. [12]

Les éoliennes peuvent être à axe vertical ou axe horizontal



**Figure 1.11:** Eolienne à axe vertical (a) et axe horizontal (b).

### **1.4.3 Energie hydraulique**

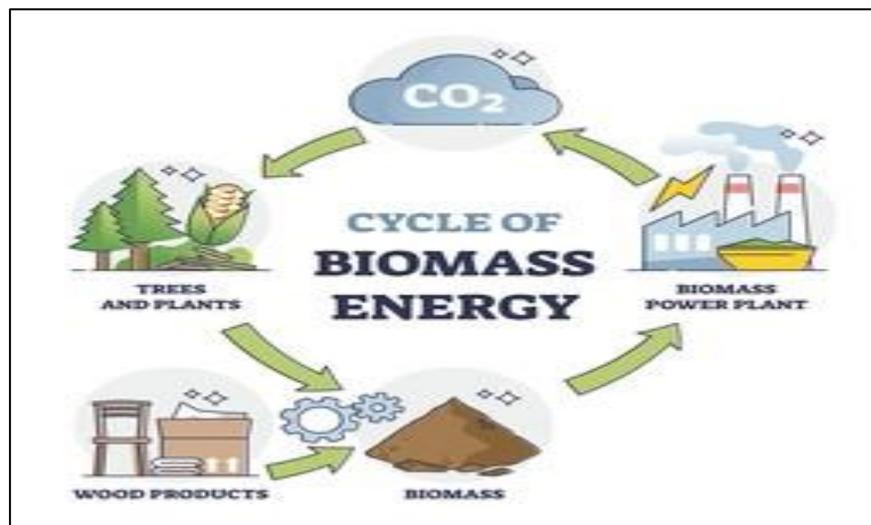
L'eau est une source d'énergie renouvelable car elle se régénère par le biais du cycle d'évaporation et de précipitation. Depuis des milliers d'années, sa force est connue et exploitée grâce aux barrages, aux moulins à eau et aux systèmes d'irrigation. Il existe plusieurs technologies pour exploiter l'énergie produite par la chute ou le mouvement de l'eau. Les roues à aubes peuvent la convertir directement en énergie mécanique (comme dans un moulin à eau), tandis que les turbines et les générateurs électriques la transforment en électricité. [13]



**Figure 1.12:** Energie hydraulique

### **1.4.4 Energie Biomasse**

L'utilisation de la biomasse remonte à l'époque où l'homme a découvert le feu et a commencé à utiliser le bois comme source de chaleur et pour cuire ses aliments. La biomasse est l'énergie contenue dans les plantes et les matières organiques. Les plantes absorbent l'énergie solaire grâce à la photosynthèse, qui est ensuite transférée aux animaux lorsqu'ils consomment ces plantes. La biomasse peut être obtenue à partir de différents secteurs et matières, tels que le bois, les récoltes spécialement cultivées pour la production d'énergie, les résidus agricoles et forestiers, les déchets alimentaires et les matières organiques provenant de déchets municipaux et industriels. Diverses technologies permettent de convertir l'énergie de la biomasse en une forme réutilisable. Ces technologies permettent de transformer l'énergie en formes directement utilisables, comme la chaleur ou l'électricité, ainsi que d'autres formes, telles que les biocarburants ou le biogaz. [22].



**Figure 1.13:** Energie Biomasse

### **1.4.5 Energie Géothermie**

La chaleur naturellement présente dans le sous-sol de notre planète représente une formidable source d'énergie. Plus on creuse profondément, plus on atteint des températures élevées. La géothermie utilise cette chaleur pour le chauffage et la production d'électricité [14]. Selon la température des différentes couches du sol, on qualifie la géothermie de « haute énergie » (150 °C), « moyenne énergie » (entre 90 et 150 °C), « basse énergie » (entre 30 et 90 °C) et de « très basse

énergie » (moins de 30 °C). Effectivement, à mesure que l'on s'enfonce dans la Terre, la température augmente et cela offre la possibilité de l'utiliser de différentes manières.

- L'énergie géothermique est une puissance développée par l'exploitation de la chaleur sous la surface de la terre.

- Des puits sont utilisés pour transporter la vapeur et l'eau chaude dans les profondeurs de la terre, jusqu' à la surface. L'eau chaude utilisée fait tourner les turbines afin de produire l'énergie électrique ou chauffer des locaux. [20]



**Figure 1.14:** Energie Géothermie

### 1.5 Les avantages des énergies renouvelables [15]

#### 1) L'énergie éolienne

- L'énergie éolienne est une source d'énergie qui ne produit aucune émission de dioxyde de carbone tout au long de son cycle de vie.
- L'énergie éolienne n'a pas besoin de carburant pour fonctionner.

#### 2) L'énergie hydroélectrique

- L'énergie hydroélectrique est généralement considérée comme ayant peu d'impacts climatiques ou environnementaux.
- L'énergie hydroélectrique offre une source d'électricité stable et à grande échelle.
- Fonctionne comme puissance de régulation.
- L'énergie hydroélectrique ne nécessite pas l'utilisation de combustibles.
- Les centrales hydroélectriques ont une durée de vie économique prolongée.

### **3) L'énergie solaire**

- Les coûts de l'énergie solaire ont diminué grâce à un fort soutien public et à ses faibles émissions de carbone.
- Combinée au stockage d'énergie et aux solutions logicielles intelligentes, l'énergie solaire devient une source d'énergie fiable et moins coûteuse.
- L'énergie solaire est une ressource illimitée, contrairement aux combustibles fossiles.
- Les systèmes solaires sont faciles à installer et demandent peu d'entretien.

## **1.6 Inconvénients des énergies renouvelables [27]**

### **1) L'énergie éolienne**

- Affecte le paysage environnant et peut causer du bruit.
- Dépendant du vent.
- Des coûts d'investissement énormes.

### **2) L'énergie hydroélectrique**

- Les centrales hydroélectriques affectent le paysage environnant et les écosystèmes.
- La construction d'une centrale hydroélectrique nécessite d'importants investissements financiers.

### **3) L'énergie solaire**

- Elle reste encore relativement coûteuse, malgré la baisse de son coût ces dernières années.
- La disponibilité de la lumière du soleil varie en fonction de l'endroit et de la saison. Les prévisions de disponibilité de l'énergie solaire sont plus incertaines que celles des combustibles fossiles, mais généralement plus fiables que celles de l'énergie éolienne.
- La production d'énergie solaire est invariable et ne peut pas être adaptée à la demande, ce qui crée un déséquilibre saisonnier. Le soleil produit plus d'électricité en été, tandis que la demande est plus élevée en hiver.

## **1.7 Les énergies renouvelables en Algérie**

L'Algérie a lancé ces dernières années un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables, visant à diversifier les sources d'énergie et préparer l'avenir du pays. Ce programme prévoit l'installation de près de 22 000 MW d'énergie renouvelable entre 2011 et 2030, dont 12 000 MW pour répondre à la demande nationale en électricité et 10 000 MW pour l'exportation. Cependant, l'exportation d'électricité dépend de garanties d'achat à long terme, de partenaires fiables et de financement extérieur. Le potentiel solaire de l'Algérie est considéré comme une opportunité majeure pour le développement économique et social, avec des projets axés sur l'implantation d'industries créatrices de richesse et d'emplois. Bien que les potentiels éoliens, de biomasse, de géothermie et d'hydroélectricité soient moins importants, des projets de fermes éoliennes et des initiatives expérimentales en biomasse et en géothermie sont également prévus. L'Algérie s'engage résolument dans la voie des énergies renouvelables pour relever les défis environnementaux et préserver les ressources énergétiques fossiles. Le solaire occupe une place centrale dans ce programme, avec une prévision d'une part de plus de 37% de la production nationale d'électricité d'ici 2030. L'éolien est également envisagé, représentant environ 3% de la production d'électricité en 2030. Des unités expérimentales seront également installées pour tester les différentes technologies de biomasse, de géothermie et de dessalement d'eau saumâtre grâce aux énergies renouvelables. [16]

## **1.8 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté une vue d'ensemble des énergies non renouvelables et renouvelables, en examinant les différents types d'énergies non renouvelables tels que le pétrole, le gaz naturel et le charbon, ainsi que les énergies renouvelables telles que l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, l'énergie biomasse et l'énergie géothermique. Il est important de souligner que l'énergie solaire est considérée comme l'énergie de l'avenir dans l'Algérie, celle-ci vise à diversifier les sources d'énergie parce qu'elle dépend maintenant sur combustible fossile (pétrole, gaz naturel...) Qui sera épuisée à l'avenir à cause de la nature géographique de l'Algérie elle dépend sur l'énergie solaire de 37%, énergie éolienne 3% et autre énergie comme la biomasse géothermique.

# **CHAPITRE 2**

**Etat de l'art sur les piles à  
combustibles et les groupes  
électrogènes**

# CHAPITRE 2

## Etat de l'art sur les piles à combustibles et les groupes électrogènes

### 2.1 Introduction

Depuis les années 90, la recherche sur les Piles à Combustible (PAC) a connu une croissance rapide en raison de plusieurs facteurs. D'une part, les réserves de pétrole, bien qu'incertaines quantitativement, sont destinées à s'épuiser. [17]

Les groupes électrogènes ont été développés dans le but de pallier les pannes de courant et de fournir de l'énergie à des emplacements éloignés qui ne sont pas connectés au réseau électrique. [18]

Dans ce chapitre, nous présentons l'état de l'art sur les piles à combustible et les groupes électrogènes afin de clarifier les notions structurelles de notre sujet d'étude principal. Nous débutons par une définition et les composants, ainsi que le principe de fonctionnement, les différents types de dihydrogène. Nous abordons ensuite le rendement, les caractéristiques et les domaines d'application des PAC. Enfin, nous discutons du modèle électrique et thermique du groupe électrogène. **Les groupes électrogènes** ont été créés pour répondre aux coupures de courant et fournir de l'énergie à des sites isolés qui ne sont pas reliés au réseau [17]. Dans ce chapitre, nous présentons l'état de l'art sur les piles à combustible et les groupes électrogènes afin de clarifier les notions structurelles de notre sujet d'étude principal. Nous débutons par une définition et les composants, ainsi que le principe de fonctionnement, les différents types de dihydrogène. Nous abordons ensuite le rendement, les caractéristiques et les domaines d'application des PAC. Enfin, nous discutons du modèle électrique et thermique du groupe électrogène.

### 2.2 Définition des piles à combustible

Les piles à combustible sont des dispositifs électrochimiques qui convertissent directement l'énergie chimique en énergie électrique. Elles sont composées d'un milieu électrolytique pris en sandwich entre deux électrodes. Une électrode (appelée anode) facilite l'oxydation électrochimique du combustible, tandis que l'autre électrode (appelée cathode) favorise la réduction électrochimique de l'oxydant. [18]

### 2.2.1 Composants piles à combustible

Les composants d'une pile à combustible sont simples. Elle est constituée de trois composants principaux :

- a-* Anode
- b-* Cathode
- c-* Électrolyte [19]

- **Anode**

L'anode est la borne négative de la pile à combustible. C'est l'électrode où a lieu l'oxydation. Elle conduit les électrons qui sont libérés des molécules d'hydrogène afin qu'ils puissent être utilisés dans un circuit externe. Des canaux y sont attachés pour disperser l'hydrogène de manière égale sur la surface du catalyseur. [32]

- **Cathode**

La cathode agit comme l'électrode positive de la pile à combustible. Elle contient des canaux qui facilitent la distribution uniforme de l'oxygène sur la surface du catalyseur. De plus, elle sert de conduit pour permettre aux électrons de circuler du circuit externe vers le catalyseur, où ils se combinent avec les ions d'hydrogène et d'oxygène pour créer de l'eau. Habituellement, du papier de fibre de carbone mince est utilisé pour créer à la fois la cathode et l'anode en raison de ses propriétés poreuses, conductrices, hydrophobes et non corrosives. Ce matériau soutient également les catalyseurs essentiels en platine qui accélèrent la réaction. Pour maintenir des performances optimales tout en réduisant les coûts, les concepteurs visent à minimiser la quantité de platine utilisée, car c'est un matériau coûteux. [32]

- **Catalyseur**

Un catalyseur est une substance chimique qui augmente le taux de réaction. Dans une pile à combustible, le catalyseur est un matériau spécial qui facilite la réaction entre l'oxygène et l'hydrogène. Il est généralement composé de poudre de platine finement revêtue de papier ou de tissu en carbone. Le catalyseur est rugueux et poreux de manière à ce que la surface maximale du platine soit exposée à l'hydrogène ou à l'oxygène. Le platine étant très coûteux, la quantité utilisée (appelée chargement de catalyseur) est un facteur important dans le coût d'une pile à combustible.

Les concepteurs de piles à combustible s'efforcent de minimiser la quantité de platine utilisée tout en maintenant une bonne performance de la pile. [32]

- **L'électrolyte**

L'électrolyte facilite la conduction des ions chargés entre les électrodes dans une pile à combustible. Ce matériau traité ne permet que la conduction des ions chargés positivement. [32]

### 2.2.2 Principe de fonctionnement

Par définition, une pile à combustible, également appelée Fuel Cells (FC) en anglais, génère de l'électricité à partir d'une réaction chimique. Cette réaction résulte du passage d'un gaz contenant une quantité élevée d'hydrogène à travers une anode, et de l'oxygène ou de l'air à travers une cathode. Un électrolyte, situé entre l'anode et la cathode, permet l'échange de charges électriques portées par des ions. Le flux d'ions à travers l'électrolyte génère un courant électrique dans un circuit externe qui alimente une charge. [20]

- **Oxydation (anode)**

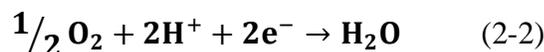
(H<sub>2</sub> /H<sup>+</sup>) au pôle (-), les molécules de l'hydrogène injecté (H<sub>2</sub>) réagissent avec le catalyseur en platine pour donner des protons (H<sup>+</sup>) et des électrons (e<sup>-</sup>) selon le système d'équations suivant : [34]



Les protons d'hydrogène traversent la membrane électrolytique pour atteindre la cathode (pôle positif), tandis que les électrons circulent à travers un circuit externe, générant ainsi un courant électrique. [34]

- **Réduction (cathode)**

O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O au pôle (+), les ions (H<sup>+</sup>) se combinent avec les ions (O<sup>-</sup>), constitués à partir de l'oxygène, pour former de l'eau : [21]



▪ Selon une réaction chimique globale



Cette équation résume le principe de fonctionnement de la pile à hydrogène/oxygène, où l'énergie chimique (apportée par les flux d'hydrogène et d'oxygène) est convertie en énergie électrique (par la circulation des électrons entre l'anode et la cathode), tout en produisant de l'eau et de la chaleur. [34]

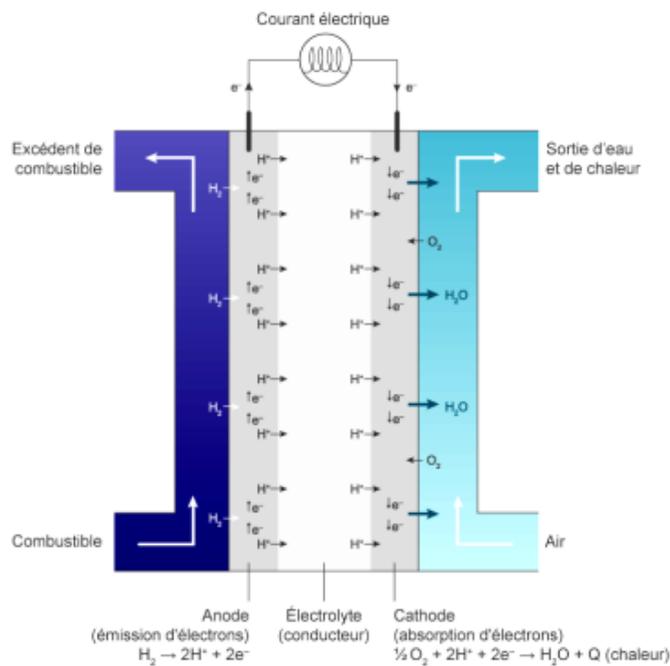


Figure 2.1: Principe de fonctionnement d'une pile à combustible.

### 2.2.3 La production de dihydrogène

L'utilisation de l'hydrogène comme combustible est essentielle pour faire fonctionner une pile à combustible. Toutefois, le dihydrogène n'est pas une source d'énergie en soi, mais plutôt un vecteur d'énergie. Pour le produire, de l'énergie est nécessaire, contrairement au dioxygène. Jusqu'à présent, la production d'hydrogène a été réalisée à partir de sources fossiles telles que le vapoformage, qui implique la reformulation du gaz naturel. Le méthane, un carburant gazeux, est combiné avec de la vapeur d'eau pour effectuer diverses réactions chimiques. Cette expérience doit

être effectuée à une température très élevée, sous pression atmosphérique et en présence d'un catalyseur. [22]

### 2.2.3.1 Les différents types de production et applications

#### 1. Le vapoformage

Le processus de vapoformage implique la réaction du méthane issu du gaz naturel avec de la vapeur d'eau et un catalyseur tel que le nickel ou un autre métal. Ce catalyseur encourage la production d'hydrogène. Pour favoriser la production d'hydrogène, la vapeur d'eau doit être soumise à des températures très élevées et à une pression élevée. La réaction de reformage du méthane est décrite par l'équation suivante [35] :



#### 2. L'électrolyse de l'eau

L'électrolyse est un processus qui permet de séparer l'eau en dioxygène et dihydrogène gazeux en utilisant un courant électrique. [35]

### 2.2.4 Avantages et inconvénients de la pile à combustible

#### Avantages [23]

- Les cellules de combustible ont une efficacité supérieure à celle des moteurs diesel ou à gaz.
- La plupart des cellules de combustible fonctionnent en silence, contrairement aux moteurs à combustion interne. Elles sont donc idéalement adaptées pour une utilisation à l'intérieur de bâtiments tels que les hôpitaux.
- Les cellules de combustible peuvent éliminer la pollution causée par la combustion de combustibles fossiles ; pour les cellules de combustible alimentées à l'hydrogène, le seul sous-produit au point d'utilisation est de l'eau.
- étant donné que l'hydrogène peut être produit n'importe où il y a de l'eau et une source d'énergie, la production de combustible peut être distribuée et ne dépend pas du réseau électrique.
- les cellules de combustible n'ont pas besoin de combustibles conventionnels tels que le pétrole ou le gaz, ce qui peut réduire la dépendance économique à l'égard des pays

producteurs de pétrole et créer une plus grande sécurité énergétique pour le pays utilisateur.

- L'utilisation de cellules de combustible stationnaires pour générer de l'énergie au point d'utilisation permet de créer un réseau électrique décentralisé qui est potentiellement plus stable.



### **Inconvénients**

- Il peut également être stocké à des températures et pressions modérées dans un réservoir contenant un absorbeur d'hydrure métallique ou un absorbeur de carbone, bien que ces options soient actuellement très coûteuses.
- Le coût de production et de maintenance est trop élevé.
- Durée de vie trop faible
- Disponibilité insuffisante de l'hydrogène [24]

## **2.2.5 Différents types des piles à combustible**

Il y a plusieurs types de cellules de combustible qui se distinguent principalement par le type d'électrolyte utilisé et la température de fonctionnement.

- **AFC:** Pile alcaline (Alkaline Fuel Cell)
- **PEMFC:** Pile à membrane polymère échangeuse de proton (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)
- **DMFC:** Pile alimentée directement par méthanol (Direct Methanol Fuel Cell)
- **PAFC:** Pile à acide phosphorique (Phosphoric Acid Fuel Cell)
- **MCFC:** Pile à carbonate de fondu (Molten Carbonate Fuel Cell)
- **SOFC:** Pile à oxyde solide (Solid Oxide Fuel Cell) [25]

### **2.2.5.1 Pile alcaline (AFC)**

La pile alcaline est une technologie de pile à combustible qui a été développée dans les années 60 pour alimenter la navette spatiale Apollo. Elle utilise couramment un électrolyte liquide à base d'hydroxyde de potassium (KOH), qui favorise la réduction de l'oxygène.", qui accélère la

réduction de l'oxygène. Cette pile fonctionne de manière optimale uniquement avec de l'hydrogène et de l'oxygène purs, car l'utilisation d'air ou d'hydrogène reformé entraîne la formation de carbonate de potassium, ce qui réduit la mobilité des ions. Malgré cela, elle présente l'avantage d'utiliser une large gamme de catalyseurs et d'avoir le meilleur rendement parmi toutes les piles à combustible. [26]

### **2.2.5.2 Pile à membrane à électrolyte polymère (PEMFC)**

La technologie de pile à combustible la plus prisée pour les applications dans les transports utilise des membranes Nafion depuis les années 80. Elle fonctionne à des températures basses (80°C) pour maintenir l'eau à l'état liquide dans la membrane. Un catalyseur à base de platine est utilisé aux électrodes pour permettre le passage des protons H<sup>+</sup>. Cependant, le monoxyde de carbone peut réduire l'efficacité de la pile en étant absorbé sur ce catalyseur. Les plaques bipolaires peuvent être conçues de trois manières différentes : en composite, en métal ou en graphite[27].

### **2.2.5.3 Pile à méthanol direct (DMFC)**

La pile à combustible à membrane d'échange de protons (PEMFC) utilisant du méthanol comme carburant. Contrairement à ce que l'on pourrait penser, le méthanol est en contact direct avec l'anode et n'est pas produit à partir d'un reformage externe. Cette pile utilise une membrane électrolytique échangeuse d'ions et un catalyseur à base de ruthénium et de platine pour éviter l'empoisonnement par le monoxyde de carbone. Les plaques bipolaires peuvent être en graphite, en métal ou en composite. [40]

### **2.2.5.4 Pile à acide phosphorique (PAFC)**

Cette technologie de pile à combustible est principalement utilisée pour des applications stationnaires, et elle a connu un développement et une commercialisation significatifs par rapport aux autres technologies de piles. Des centrales électriques utilisant cette technologie sont déjà opérationnelles dans le monde, offrant une puissance allant de 5 à 20 MW. L'électrolyte utilisé est de l'acide phosphorique, sous forme liquide, stabilisé dans une matrice à base de carbure de silicium (SiC), ce qui améliore la conductivité de l'électrolyte et réduit la corrosion des électrodes en carbone. Les plaques bipolaires sont composées de deux plaques poreuses séparées par une fine feuille de graphite pour stocker l'électrolyte, tandis que le catalyseur utilisé est à base de platine. [40]

### 2.2.5.5 Pile à carbonate fondu (MCFC)

Le fonctionnement d'une pile à combustible à électrolyte de carbonates alcalins dans une matrice céramique de  $\text{LiAlO}_2$ . Les carbonates alcalins fondent à des températures élevées et les ions carbonates assurent la conduction ionique. Le Ni (anode) et l'oxyde de nickel (cathode) sont utilisés pour favoriser la réaction à des températures élevées. Les MCFC sont utilisés principalement pour des applications fixes et marines en raison de leur taille et de leur poids relativement importants et de leur temps de démarrage lent. Ils peuvent utiliser une large gamme de carburants conventionnels et renouvelables, et sont également envisagés pour les applications de DCFC. Bien que le nombre de développeurs de MCFC soit limité, le développement et les démonstrations se poursuivent. [28]

### 2.2.5.6 Pile à oxyde solide (SOFC)

La pile à oxyde solide est une pile qui fonctionne à haute température, utilisée pour la production d'électricité décentralisée. Elle utilise des hydrocarbures qui peuvent être facilement reformés, sans nécessiter l'utilisation de catalyseurs à base de métaux nobles. L'électrolyte est solide, généralement constitué de zircone ( $\text{Zr}_2$ ) dopé avec de l'ytterbium ( $\text{Y}^{3+}$ ), qui sert de conducteur pour l'anion oxygène ( $\text{O}_2$ ). Contrairement à d'autres technologies, la pile à oxyde solide peut être de forme tubulaire ou plane. [40]

**Tableau 2.1:** Réactions électrochimiques de chaque technologie de piles à combustible. [40]

<i>PILE A COMBUSTIBLE</i>	<i>REACTION A L'ANODE</i>	<i>REACTION A LA CATHODE</i>
<i>AFC</i>	$\text{H}_2 + 2(\text{OH})^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 2e^-$	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2e^- \rightarrow 2(\text{OH})^-$
<i>PEMFC et PAFC</i>	$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2e^-$	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2e^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$

<i>MCFC</i>	$H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$	$\frac{1}{2}O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$
<i>SOFC</i>	$H_2 + O^{2-} \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	$\frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$

Tableau 2.2: Différents types de piles à combustible. [38]

PàC	Electrolyte	T° fonctionnement	Combustible	Comburant
AFC	Solution KOH	< 100° C	H <sub>2</sub> pur	Air ou O <sub>2</sub> pur
PEMFC	Membrane a échange de protons (à base de fluor)	50-85°C	H <sub>2</sub> pur	Air ou O <sub>2</sub> pur
DMFC	Membrane à échange de protons	60-120°C	CH <sub>3</sub> OH	Air ou O <sub>2</sub> pur
PAFC	Acide phosphorique	160-220°C	H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CH <sub>3</sub> OH	Air
MCFC	Mélange de Li <sub>2</sub> Co <sub>3</sub> et de Kco <sub>3</sub>	600-800°C	H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub>	Air
SOFC	Oxyde de Zirconium stabilisé ZrO <sub>2</sub> et yttrium Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	600-1000°C	H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CH <sub>3</sub> OH, Co	Air

## 2.2.6 Rendements de fonctionnement des PAC

### 2.2.6.1 Rendement thermodynamique

On peut définir un rendement thermodynamique maximal théorique (dans des conditions standard) en comparant l'énergie électrique produite à l'énergie thermique de la réaction électrochimique : [34]

$$\eta_{\text{thermo}} = \frac{\Delta G^0}{\Delta H^0} \quad (2-5)$$

La réaction de formation de l'eau, lorsque celle-ci est produite à l'état liquide à 25°C et à une pression de 1 bar, libère une variation d'enthalpie libre standard  $\Delta G^0 = -237, 2 \text{ kJ/mol}$ , et une variation d'enthalpie de  $\Delta H^0 = -285, 8 \text{ kJ/mol}$  [29]. On trouve alors un rendement thermodynamique : [34]

$$\eta_{\text{thermo}} = 83\%$$

### 2.2.6.2 Rendement de matière

En ce qui concerne le rendement global, il est important de prendre en compte la consommation des gaz. En pratique, tous les gaz fournis ne sont pas entièrement consommés par la pile, et on utilise généralement un coefficient d'utilisation des gaz, estimé généralement à 0,95. [34]

$$\eta_{\text{matiere}} = 95\%$$

### 2.2.6.3 Rendement voltaïque

Ce rendement se calcule par le rapport entre la tension de sortie de la pile et la tension

$E_0$  à la température concernée : [34]

$$\eta_{\text{voltaïque}} = \frac{v_{\text{pile}}}{E_0} \quad (2-6)$$

$E_0 = 1, 23 \text{ V}$

### 2.2.6.4 Rendement global [34]

Il s'agit de prendre en compte tous les rendements précédents :

$$\eta_{\text{global}} = \eta_{\text{matiere}} \times \eta_{\text{thermo}} \times \eta_{\text{voltaique}} \quad (2-7)$$

En pratique, la tension d'utilisation d'une cellule de PEM se situe autour de 0,7V. Nous pouvons alors calculer un rendement global approximatif : [34]

$$\eta_{\text{global}} = 0.43$$

### 2.2.7 Caractéristiques de technologie des piles à combustible

- **Densité de courant**

Étant donné que les réactions électrochimiques se produisent à la surface des électrodes, la densité de courant est une grandeur caractéristique d'une pile à combustible. Elle est exprimée en ampères par centimètre carré (normalisée à la surface physique de l'électrode). Cette densité de courant dépend de nombreux paramètres tels que le type de pile à combustible, le débit de combustible, etc. [30]

- **Tension réelle**

La tension théorique d'une pile à combustible est celle mesurée en circuit ouvert, c'est-à-dire lorsqu'aucun courant ne circule. Lorsque l'on connecte les bornes de la pile à combustible à une charge et qu'un courant d'intensité  $i$  circule, la tension aux bornes de la pile diminue par rapport à la tension théorique en raison des phénomènes de polarisation. On distingue trois formes de polarisation :

- **Polarisation d'activation** concerne la diffusion des ions à l'interface électrode/électrolyte, et elle est liée au transfert de charges.
- **Polarisation de résistance** est due à la résistance électrique des différents composants de la pile, en particulier de l'électrolyte.
- **Polarisation de concentration** dépend de la concentration de l'électrolyte autour des électrodes. Ces trois formes de polarisation sont illustrées dans (figure 2-2). [43]

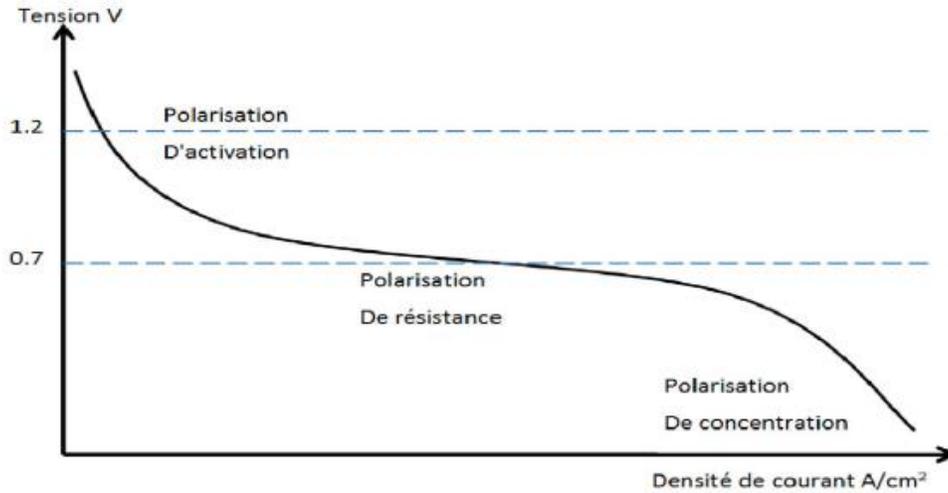


Figure 2.2: Influence de la polarisation sur la tension. [43]

### 2.2.8 Domain d'application

Les piles à combustibles sont utilisées dans divers domaines, qui seront présentés ci-dessous :



Figure 2.3: Domaines d'application des piles à combustible. [31]

#### 🚦 Applications portables

Parmi ces applications, on trouve notamment les téléphones mobiles avec une puissance moyenne d'environ 400 mW et les ordinateurs portables avec une puissance moyenne de 10 W. Ces applications connaissent une croissance significative, et les recherches les plus importantes se

concentrent sur l'utilisation d'une pile à combustible pour charger une petite batterie, permettant ainsi de mieux répondre aux besoins énergétiques lors des pics de consommation. [32]

### Applications stationnaires (résidentiels)

Le secteur électrique suscite un intérêt croissant de la part des industriels, en particulier aux États-Unis, en raison de la déréglementation et de la tendance vers la décentralisation de la production d'énergie électrique. L'activité est centrée sur deux domaines d'application : la production collective, qui concerne des puissances allant de 200 kW à quelques MW, et la production individuelle ou domestique, qui concerne des puissances allant de 2 à 7 kW. [33]

### Applications mobiles (transports)

Le développement de la pile à combustible a été initié dans le domaine du transport dans les années 90. Dans ce secteur, il y a une forte contrainte de coût et une concurrence de la technologie traditionnelle (moteur thermique). Selon qu'il s'agit d'un véhicule léger ou lourd, les besoins et les durées de fonctionnement diffèrent considérablement. Un véhicule léger nécessite environ 3000 heures de fonctionnement sur une durée de vie d'une dizaine d'années, tandis qu'un véhicule lourd nécessite une durée de fonctionnement 100 fois plus longue. Les coûts admissibles et les durées d'amortissement ne seront donc pas les mêmes pour ces deux types de véhicules [34]

### Applications militaires et spatiales

Les caractéristiques spécifiques des piles sont utilisées dans des secteurs de pointe tels que le militaire et l'aérospatial. La NASA a utilisé des piles à combustible de type AFC pour alimenter les circuits électriques des navettes spatiales lors des programmes GEMINI et APOLLO. Ils envisagent maintenant d'utiliser des PEMFC pour des applications futures. De même, l'armée allemande a développé un sous-marin fonctionnant grâce à des PAC. Ces applications sont rares de nos jours. [35]

## 2.3 groupe électrogène

Un groupe électrogène est un équipement autonome conçu pour produire de l'électricité. Il se compose généralement d'un moteur thermique qui entraîne un alternateur. La puissance d'un groupe électrogène est mesurée en VA (Volt Ampère), kVa (kilo Volt Ampère) ou MVA (Méga Volt Ampère).

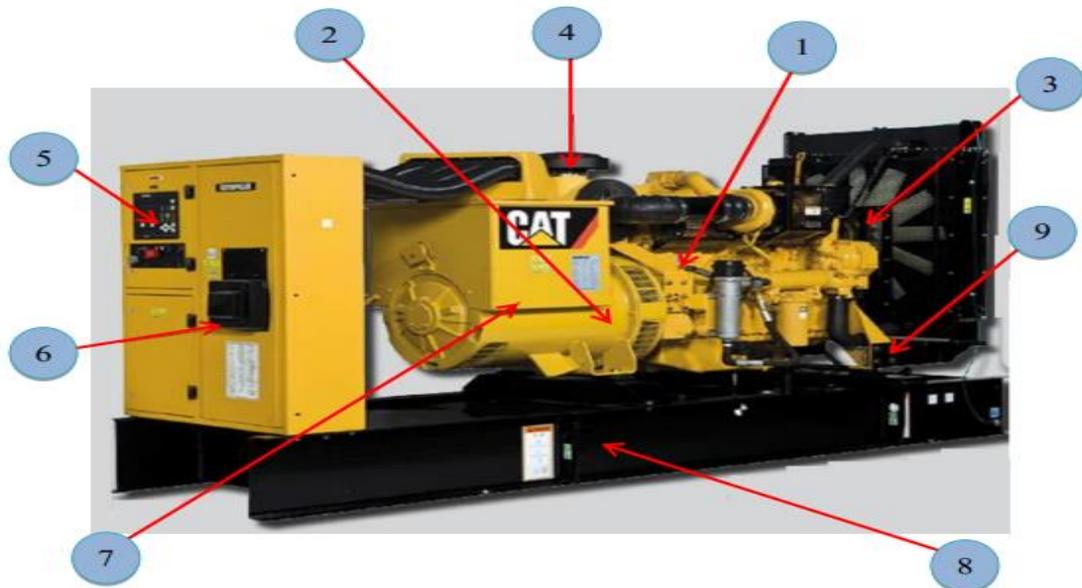
Leur poids et leur taille peuvent varier de quelques kilogrammes à plusieurs dizaines de tonnes. Les groupes électrogènes sont utilisés pour fournir des niveaux élevés de puissance et de longue durée de fonctionnement. Ils sont couramment utilisés dans l'industrie pour assurer la continuité de la production. [36]

### 2.3.1 Principe de fonctionnement

L'utilisation d'un groupe électrogène pour la production d'électricité doit être autonome, ce qui signifie qu'elle ne dépend pas d'un approvisionnement en carburant provenant d'une source d'énergie éloignée. L'électricité est toujours produite par une génératrice, qui génère un courant continu ou alternatif. Pour produire ce courant, la génératrice doit recevoir un mouvement rotatif de son arbre d'entraînement. Ce mouvement est généré par un moteur thermique alimenté à l'essence, au GPL ou au diesel. [37]

### 2.3.2 Constitution d'un groupe électrogène

Le schéma de fonctionnement d'un groupe électrogène est présenté sur la figure 2.4



1. Moteur thermique diesel - 2. Alternateur - 3. Système de refroidissement - 4. Filtre à air - 5. Tableau de commande et de contrôle - 6. Disjoncteur - 7. Régulateur de tension (AVR) - 8. Châssis - 9. Dispositif de protection.

**Figure 2.4:** Groupe électrogène. [49]

### 2.3.3 Différents types des groupes électrogènes [38]

Il y a trois types de groupes électrogènes qui ont pour fonction de produire de l'énergie. Bien qu'ils partagent le même principe de fonctionnement, ils n'utilisent pas la même technologie. Il y a les **groupes électrogènes** diesel, les groupes électrogènes à essence et les groupes électrogènes insonorisés (tels que le Cloueur SpitPaslode). L'utilisation d'un groupe électrogène sur une alimentation de secours.

- **Les groupes électrogènes diesel**

Ils sont communément utilisés pour les grands chantiers car ils émettent des niveaux sonores élevés qui ne sont pas appropriés pour une utilisation domestique. Les groupes électrogènes sont disponibles dans différentes tailles en fonction de leur puissance, allant de quelques kilowatts à plusieurs milliers en fonction des besoins. Ils ont été conçus pour une utilisation intensive.



Figure 2.5: Groupe électrogène diesel kohler.

- **Les groupes électrogènes à essence**

Les groupes électrogènes sont les plus couramment utilisés et répandus. Ils sont généralement destinés à un usage domestique en raison de leur polyvalence. Le démarrage peut être effectué à l'aide d'un démarreur électrique ou manuellement avec un lanceur.



**Figure 2.6:** groupe électrogène essence.

- **Les groupes électrogènes à Gaz**

Un groupe électrogène à gaz est un système de production d'électricité qui utilise le gaz naturel comme source d'énergie. Son fonctionnement repose sur la conversion de l'énergie chimique contenue dans le gaz en énergie électrique grâce à l'utilisation d'un moteur à combustion interne, associé à un alternateur.



**Figure 2.7:** groupe électrogène a Gaz

Les groupes électrogènes à gaz offrent plusieurs avantages par rapport aux autres types de générateurs d'électricité. Voici quelques-uns de leurs avantages :

**Efficacité énergétique :** Les moteurs à gaz naturel ont un rendement énergétique élevé, ce qui signifie qu'ils peuvent produire plus d'électricité à partir de la même quantité de carburant par rapport à d'autres sources d'énergie.

**Moins de pollution :** Les groupes électrogènes à gaz produisent moins d'émissions nocives que les groupes électrogènes fonctionnant au diesel ou à l'essence. Les émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) sont également réduites par rapport aux combustibles fossiles traditionnels.

Les groupes électrogènes à gaz émettent moins de substances nocives et de dioxyde de carbone que les groupes électrogènes diesel ou à essence, contribuant ainsi à réduire la pollution.

**Faible coût du carburant :** Le gaz naturel est généralement moins cher que le diesel ou l'essence, ce qui peut réduire les coûts d'exploitation du générateur à long terme.

**Disponibilité continue :** Contrairement aux sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie solaire ou éolienne, les groupes électrogènes à gaz peuvent fonctionner en continu, indépendamment des conditions météorologiques.

**Flexibilité de carburant :** Certains groupes électrogènes à gaz peuvent être alimentés par différents types de gaz, tels que le gaz naturel, le biogaz ou le gaz de pétrole liquéfié (GPL). Cela permet une certaine flexibilité en fonction de la disponibilité locale des différents types de gaz.

### 2.3.4 Alternateur [39]

Un alternateur est un générateur de tension et de courants électrique alternatifs. Les alternateurs appartiennent à la classe des machines synchrones. Leur vitesse de rotation est synchronisée avec la fréquence des courants alternatifs délivrés. Les alternateurs utilisés au niveau des groupes électrogènes sont de deux types : les alternateurs triphasés et monophasés. La tension en sortie est obtenue grâce au mouvement de rotation appliqué à l'entrée qui fait varier le champ magnétique créé par la bobine continue dans les encoches du rotor d'après la loi de Faraday :

$$e = L \frac{Di}{Dt} \quad (2-8)$$

**e :** tension déclenchée.

**L :** Nombre de boucles.

**Di** : Variation du flux magnétique.

**Dt** : Variation temporelle

La puissance indiquée par le constructeur est sa puissance apparente (S). Les pertes font que le rendement d'un alternateur est de 0,95%. La puissance mécanique qu'il faut appliquer à l'alternateur est donc :  $P_m = S / \eta$ .

**P<sub>m</sub>** : Puissance mécanique

**S** : Puissance apparente

**η** : Le rendement.

La figure ci-dessous illustre le principe de conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique.



**Figure 2.8:** principe de transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique.

### 2.3.5 Batterie

La batterie a pour fonction principale de fournir suffisamment de courant pour démarrer le moteur à combustion interne et peut également alimenter certains équipements permanents et accessoires tels que le ventilateur de refroidissement lorsque le moteur est à l'arrêt. Elle est rechargée par l'alternateur et peut fournir un complément d'énergie en cas de forte consommation électrique. [40]

- **Le moteur thermique [53]**

Les moteurs thermiques ont pour fonction de convertir l'énergie thermique en énergie mécanique. Ils sont également connus sous le nom de moteurs à combustion et se divisent en deux types distincts :

- **Moteurs à combustion interne**

La chaleur est générée par la combustion à l'intérieur d'une chambre dont le volume varie, ce qui augmente la pression dans le gaz qui y est contenu (le gaz est constitué initialement du combustible et du comburant). Cette augmentation de pression se traduit par une force exercée sur un piston, qui convertit le mouvement de translation du piston en un mouvement de rotation de l'arbre (vilebrequin).

- **Moteurs à combustion externe**

Dans un système de production d'énergie thermique, la chaleur est générée dans une chambre de combustion distincte de la chambre d'expansion. Cette chaleur est utilisée pour vaporiser de l'eau, créant ainsi de la vapeur d'eau. Cette vapeur d'eau est ensuite dirigée vers la chambre d'expansion (cylindre) où elle agit sur un piston. Un mécanisme bielle-manivelle est utilisé pour convertir l'énergie mécanique produite en fonction des besoins. L'eau fournie à l'évaporateur est transformée en vapeur d'eau grâce à l'apport de chaleur. Cette vapeur d'eau sous pression est distribuée vers le piston, où elle exerce une force qui est exploitée par le mécanisme bielle-manivelle. Les distributeurs permettent d'acheminer alternativement la vapeur d'eau vers les différentes faces du piston, assurant ainsi l'admission et l'échappement appropriés.

### **2.3.6 Le synchroscope**

Il est couramment utilisé dans les groupes électrogènes de grande puissance qui doivent fonctionner en parallèle avec d'autres groupes ou être connectés au réseau électrique. Le but du synchroniseur est de synchroniser chaque phase du groupe avec chaque phase d'un autre groupe. [49]

### **2.3.7 La capacité d'énergie du groupe électrogène**

**La puissance** de secours d'urgence (ESP) correspond à la puissance nominale de secours qui peut alimenter des charges variables durant une coupure de courant. Il n'est pas possible de dépasser cette puissance. Le facteur de charge moyen sur 24 heures de fonctionnement est inférieur à 70%.

La puissance principale (PRP) permet de faire fonctionner le groupe électrogène avec une charge variable pendant une durée illimitée. Il est possible de surcharger le groupe de 10% pendant

1 heure pour 12 heures de fonctionnement. Le facteur de charge moyen sur 24 heures de fonctionnement est inférieur à 70%.

La puissance nominale continue à 40° (kVa) est de 500 VA, avec un taux de déséquilibre maximum de 70%. [51]

## **2.4 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté un aperçu, sur les piles à combustibles et les groupes électrogène ont des avantages et des inconvénients différents. Les piles à combustibles convertissent l'énergie chimique en électricité avec de l'hydrogène comme source, produisent de l'eau et de la chaleur comme sous-produits, mais sont coûteuses et dépendent de la disponibilité de l'hydrogène. Les groupes électrogènes produisent de l'électricité à partir de la combustion de carburants fossiles, sont peu coûteux et faciles à utiliser, mais émettent des gaz à effet de serre et des polluants atmosphériques. Les piles à combustibles ont un potentiel important pour produire une électricité propre.

# **CHAPITRE 3**

**Etude et modélisation du système  
hybride Pile à combustible- groupe  
électrogène à gaz**

# **CHAPITRE 3**

## **Etude et modélisation du système hybride Pile à combustible- groupe électrogène à gaz**

### **3.1 Introduction**

La modélisation est une méthode qui permet de représenter mathématiquement le comportement d'un système physique donné. Dans ce contexte, elle est utilisée pour décrire les différentes composantes d'un système hybride. L'objectif principal d'un tel système est d'utiliser des sources d'énergie renouvelable pour répondre à la demande énergétique, et le stockage d'énergie joue un rôle crucial pour répondre aux besoins en temps réel et éviter les interruptions d'approvisionnement. Les batteries sont couramment utilisées comme moyen de stockage d'énergie. [41][42]

### **3.2 Les systèmes hybrides**

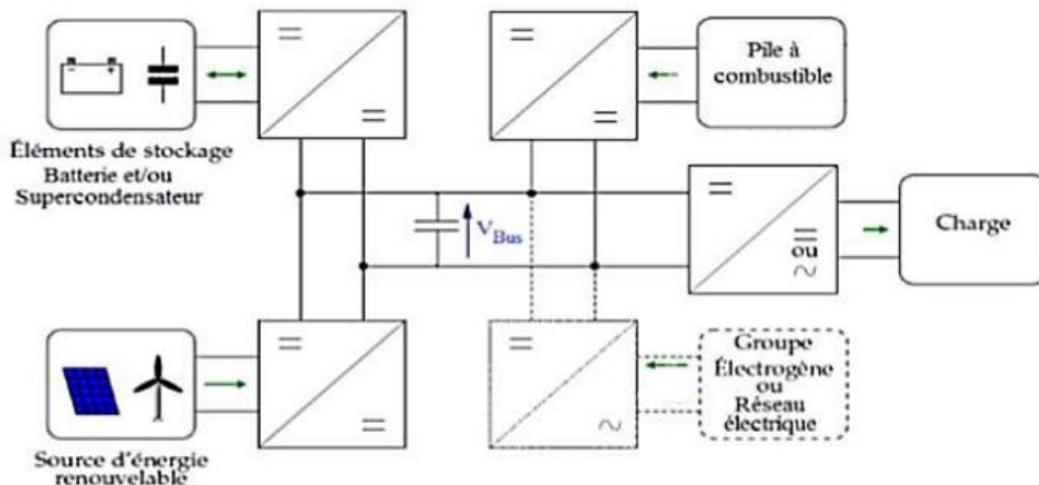
Les systèmes hybrides d'énergie sont généralement indépendants des réseaux électriques interconnectés et sont fréquemment utilisés dans des régions isolées. Les systèmes hybrides à énergies renouvelables sont fiables, non polluants et sont capables de répondre à la demande énergétique sur de longues durées. [43]

L'hybridation des sources consiste à combiner deux ou plusieurs sources pour exploiter leurs différentes caractéristiques (Autonomie, Réversibilité, Dynamique). C'est le cas des véhicules hybrides qui associent deux ou plusieurs sources d'énergie de nature différentes caractéristiques pour la propulsion du véhicule.

Les systèmes hybrides électriques peuvent être illustrés par la Figure (3.1). Il s'agit d'une structure plus globale, où il est possible d'ajouter ou de retirer des sources et des charges en fonction de la topologie du système.

Il y a plusieurs configurations de systèmes hybrides ou multi sources :

- Système hybride Eolien Générateurs photovoltaïques (figure 3.1) : C'est des systèmes utilisés dans les sites isolés et peuvent être connectés au réseau.
- Système hybride Eolien Groupes électrogènes : C'est des systèmes utilisés dans les sites isolés
- Système hybride Générateurs photovoltaïques Groupes électrogènes : C'est des systèmes utilisés dans les sites isolés.
- Système hybride Eolien Générateurs photovoltaïques groupe électrogène : C'est des systèmes utilisés dans les sites isolés
- Système hybride Générateurs photovoltaïques pile à combustibles : C'est des systèmes utilisés dans les sites isolés et peuvent être connectés au réseau.
- Système hybride Eolien pile à combustibles : C'est des systèmes utilisés dans les sites isolés et peuvent être connectés au réseau.
- Système hybride piles à combustible et groupe électrogène : C'est des systèmes utilisés dans les sites isolés. C'est cette configuration que nous avons choisie pour notre étude dans ce qui suit En effet on utilise ce type de système dans les sites isolés et dont on n'a pas de grand moyens d'approvisionnement.



**Figure 3. 1:** exemple d'un système électrique hybride [54].

Le niveau de tension du bus continu varie en fonction de ses applications :

- 42V, une nouvelle norme de tension pour les systèmes automobiles.
- 270V ou 350V sont les tensions standard pour les avions entièrement électriques.
- 48V, 120V pour les systèmes autonomes.
- 400-480V pour les systèmes connectés aux réseaux électriques.
- 270-540V pour les véhicules hybrides électriques à pile à combustible.
- 350V (systèmes de bus de transport en commun) à 750V (les systèmes de tramway et de locomotive) [54].

### **3.3 Avantages et inconvénients d'un système hybride [44]**

#### **➤ Les avantages**

- Non dépendant d'une seule source d'énergie.
- Flexible, extensible et capable de satisfaire des charges évolutives.
- Exploitation simple, travaux de maintenance et de révision réduits.

#### **➤ Les inconvénients**

- Les systèmes multi-sources sont plus complexes que les systèmes à source unique et nécessitent un stockage.
- Ils ont un coût initial élevé par rapport aux générateurs diesel.

### **3.4 Les convertisseurs statiques**

Les convertisseurs statiques sont des dispositifs à composants électroniques semi-conducteurs capables de modifier la forme et/ou la fréquence d'une onde électrique.

#### **➤ Convertisseur DC/DC (hacheur)**

Les convertisseurs continus ont pour fonction de générer une tension continue variable à partir d'une tension continue constante. La tension continue d'entrée peut provenir d'un réseau alternatif redressé et filtré, d'une batterie d'accumulateurs ou d'une alimentation stabilisée. [54].

➤ **Convertisseur DC/AC (onduleur)**

L'objectif principal de l'onduleur est de convertir le courant continu produit par le générateur solaire en courant alternatif monophasé ou triphasé. Un onduleur est généralement conçu pour fonctionner dans une plage de fonctionnement spécifique. Il existe différents types d'onduleurs en fonction de la qualité du signal de sortie, tels que :

- ✓ Onduleur à onde sinusoïdale modifiée, en marche d'escalier, générateur d'une onde proche de l'onde sinusoïdale.
- ✓ L'onduleur à modulation de largeur d'impulsion (MLI).
- ✓ Onduleur à onde sinusoïdale [54].

➤ **Convertisseur AC/DC (Redresseur)**

Le redresseur commandé est le montage le plus simple des montages d'électronique de puissance et permet de transformer l'énergie alternative provenant en général du réseau électrique en une énergie unidirectionnelle quasi continue que l'on peut diriger vers les moteurs à courant continu [54].

### **3.5 Topologies des systèmes électriques hybrides**

Il existe différentes topologies de systèmes hybrides selon le couplage de générateurs d'énergie renouvelable, qui peut être continu ou alternatif.

Un système hybride couplé au bus continu est un système dans lequel les différentes sources sont raccordées avec la charge de consommation à l'aide des capacités [54].

Un système hybride couplé au bus AC, est un système dans lequel les différents générateurs d'alimentation sont directement reliés à un réseau de courant alternatif ou à des charges de consommation à courant alternatif. [54].

### 3.5.1 Architecture à bus à CC

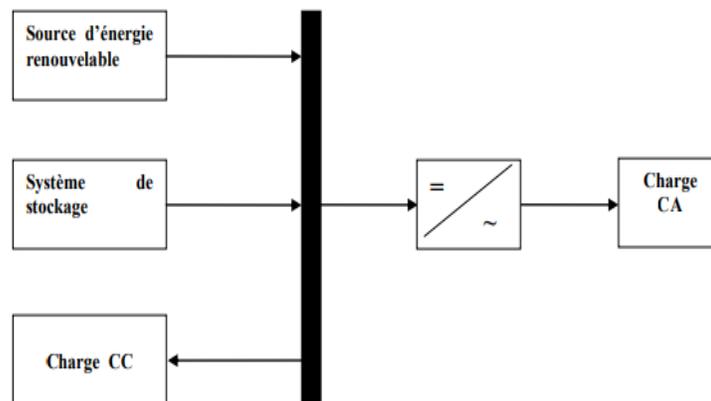
Le système hybride présenté dans la (Figure 3.2) utilise un bus à courant continu pour centraliser la puissance fournie par chaque source d'énergie. Les systèmes de conversion d'énergie à courant alternatif fournissent leur puissance à un redresseur pour être convertie en courant continu. L'r alimente ensuite les charges à courant alternatif à partir du bus à courant continu en suivant la consigne pour l'amplitude et la fréquence. Les batteries et l'onduleur sont conçus pour répondre aux pics de charge. Les avantages et inconvénients de ce système sont discutés ci-dessous. [63]

#### Avantage

- Le fait de connecter toutes les sources sur un bus à courant continu simplifie le système de commande.

#### Désavantage

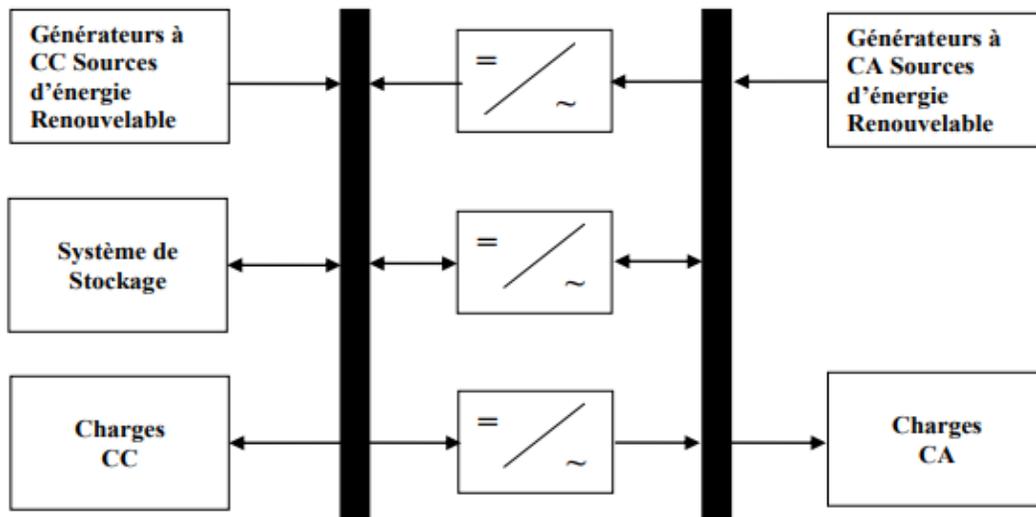
- Le rendement global du système est faible car une certaine quantité d'énergie est perdue à cause des batteries et des pertes dans les convertisseurs.



**Figure 3. 2:** Configuration du SEH à bus CC[45]

### 3.5.2 Architecture mixte à bus à CC/CA

La configuration à deux bus (CC et ça), illustrée dans la (Figure 3.3), offre de meilleures performances que la configuration précédente. Dans cette configuration, les sources d'énergie renouvelable peuvent directement alimenter une partie de la charge en CA, ce qui améliore le rendement global. Le redresseur et l'onduleur peuvent être remplacés par un convertisseur bidirectionnel qui assure la fonction d'onduleur pour la conversion CC/CA et la fonction de redresseur pour la recharge des batteries en cas de surplus d'énergie du générateur renouvelable. [58]



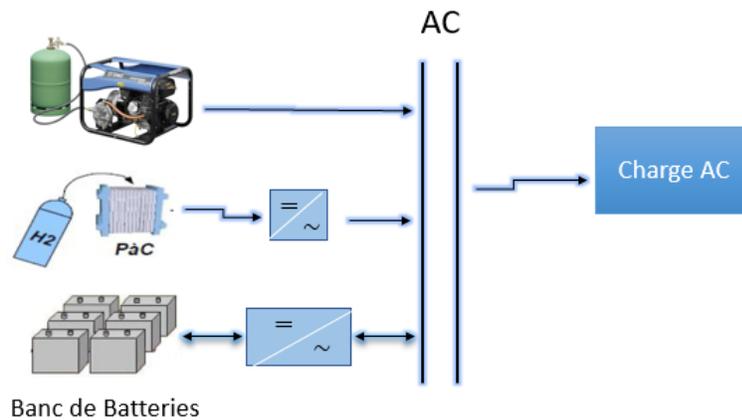
**Figure 3. 3:** Configuration du SEH à deux bus à CC et à CA [58]

### **3.6 Etude du système hybride pile à combustible - groupes électrogènes**

Les systèmes hybrides sont des systèmes énergétiques qui combinent différentes sources d'énergie pour répondre aux besoins énergétiques spécifiques. Les micro-réseaux, les systèmes de stockage d'énergie, les systèmes de chauffage et de climatisation hybrides, les véhicules hybrides et les systèmes de production d'énergie éolienne et solaire hybrides sont des exemples de systèmes hybrides. Ces systèmes sont de plus en plus utilisés en raison de leur efficacité énergétique accrue, de leur fiabilité et de leur contribution à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. La

recherche et le développement continuent de progresser dans ce domaine pour permettre une adoption encore plus large de ces systèmes dans les années à venir.

Le système hybride pile à combustible - groupes électrogènes (figure 3.4) combine les avantages des piles à combustible et des groupes électrogènes pour produire de l'électricité de manière propre et efficace. Les piles à combustible utilisent de l'hydrogène comme combustible et de l'oxygène comme oxydant pour produire de l'électricité, tandis que les groupes électrogènes utilisent la combustion de combustibles fossiles. Les piles à combustible produisent de l'électricité sans émissions polluantes, mais sont limitées en termes de puissance et de durée de vie, tandis que les groupes électrogènes sont plus puissants et durables, mais produisent des émissions polluantes. Le système hybride permet d'avoir une source d'électricité de secours puissante et durable tout en minimisant l'impact environnemental.



**Figure 3. 4:** Schéma synoptique du système hybride pile à combustible - groupes électrogènes

La figure 3.4 représente la configuration du système hybride :( batterie à combustion - groupe électrogène. Le système consiste en une pile à combustible pour générer de l'électricité en brûlant de l'hydrogène et de l'oxygène à l'intérieur de la pile à combustion. En cas d'arrêt de la pile à combustible ou d'épuisement de l'hydrogène gazeux, le groupe électrogène fonctionne est Fournir à la maison l'électricité nécessaire. Si les deux générateurs sont arrêtés :( batterie et groupe

électrogène), L'électricité nécessaire est fournie à la maison par l'électricité stockée dans d les systèmes des batteries.

### 3.7 Modélisation de la pile à combustible

#### 3.7.1 Le modèle statique

La relation suivante exprime la tension de la cellule élémentaire d'une pile à combustible de type PEMFC :

$$V_{PAC} = E - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (3-1)$$

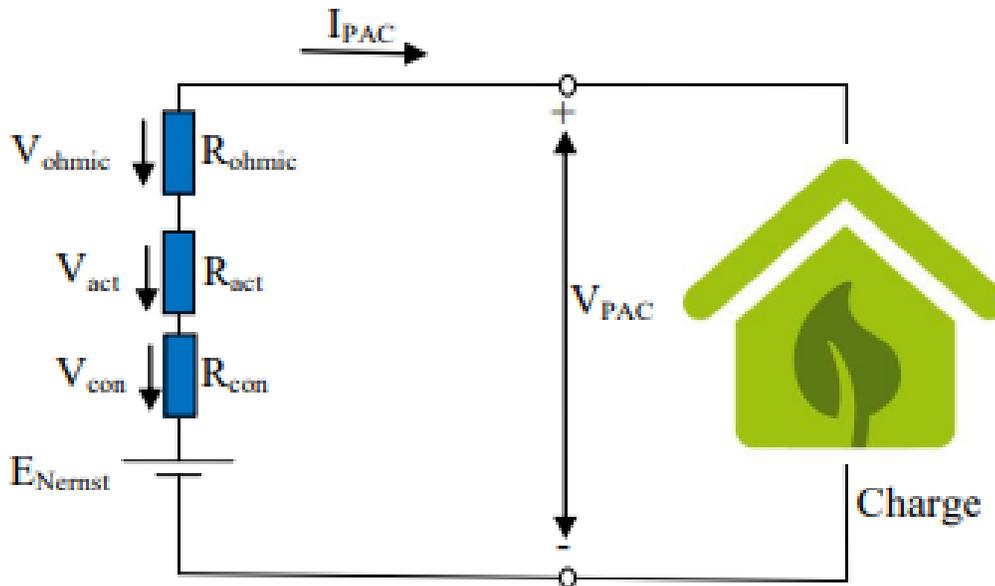
$V_{PAC}$ : Tension réelle d'une pile unitaire (Volt)

$E$  : la tension théorique à vide

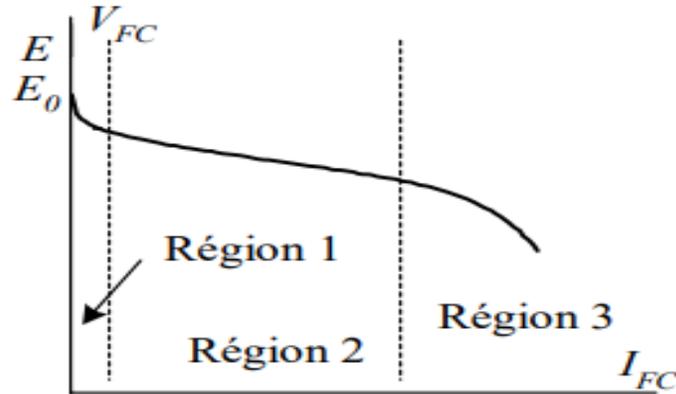
$V_{act}$  : Pertes d'activation (volt), (ou chute d'activation de la région 1)

$V_{ohm}$ : Pertes ohmiques (volt), (ou chute ohmique de la région 2)

$V_{conc}$ : Pertes de concentration (volt), (ou chute de concentration de la région 3) [46][47]



**Figure 3. 5:** Caractéristique statique de pile PEM. [59]



**Figure 3. 6:** Représentation électrique d'une pile à combustible. [60]

➤ **Pertes d'activation** [59]

Les pertes d'activation dans une pile à combustible résultent du démarrage des réactions chimiques aux électrodes, où une partie de l'énergie disponible est consommée pour la dissociation et la recombinaison. Les liaisons chimiques. Si ces pertes se produisent aux deux électrodes, la réaction d'oxydation de l'hydrogène à l'anode est plus rapide que la réduction de l'oxygène à la cathode, ce qui signifie que les pertes d'activation sont principalement dues aux réactions cathodiques. L'équation de Tafel établit la relation entre les pertes d'activation et la densité de courant :

$$V_{act} = A \ln \left[ \frac{I_{FC} + i_n}{i_0} \right] \quad (3-2)$$

$I_{FC}$ : Est le courant délivré par la pile à combustible

$i_0$ : Le courant d'échange caractérisant à vide les échanges électrode-électrolyte

$i_n$ : Le courant interne permettant de tenir compte d'une éventuelle traversée de gaz et/ou d'électrons à travers l'électrolyte

A : la pente de la droite de Tafel.

➤ **Pertes ohmique**

Les pertes ohmiques dans une pile à combustible sont dues à la résistance rencontrée par les électrodes et les plaques bipolaires, ce qui limite le flux d'électrons et d'électrolyte au passage des protons. La chute de tension correspondante est décrite.

$$V_{ohm} = R_m(I_{FC} + i_n) \quad (3-3)$$

Dans cette équation,  $R_m$  représente la résistance totale de la pile à combustible. [59]

➤ **Pertes de concentration**

La consommation des gaz affecte la pression partielle des gaz et diminue la richesse des mélanges gazeux. Cette réduction de pression dépend du courant fourni et des caractéristiques des circuits de gaz. La chute de tension est déterminée par une constante de transport ou de transfert de masse, et dépend également du courant limite  $i_L$ , qui représente le point où toute la source de combustible est utilisée et la pression tombe à zéro. [59]

$$V_{conc} = -B \ln \left( 1 - \frac{I_{FC} + i_n}{i_L} \right) \quad (3-4)$$

## **3.8 Modélisation du groupe électrogène [48]**

### **3.8.1 Équation du générateur**

La machine synchrone à rotor bobiné (MSRB) comporte trois (03) enroulements statiques identiques indicées respectivement a, b et c et décalées entre eux dans l'espace d'un angle électrique égal à  $2\pi/3$ . Elle comporte aussi un enroulement d'excitation (indice f), ou un aimant permanent (Machine synchrone à aimant permanent MSAP).

Les équations de la MS en notation matricielle comme suit :

- L'expression des tensions statoriques :  $[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s]$  (3-5)

$[V_s] = [v_a \ v_b \ v_c]^t$  Vecteur tensions statoriques.

$[I_s] = [i_a \ i_b \ i_c]^t$  Vecteur courants statoriques.

$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$ : Matrice résistance du stator.

$[\varphi_s] = [\varphi_a \ \varphi_b \ \varphi_c]^t$  : Vecteur flux statoriques.

- L'expression des flux statoriques :  $[\varphi_s] = [L_s][I_s] + [\varphi_{sf}]$  (3-6)

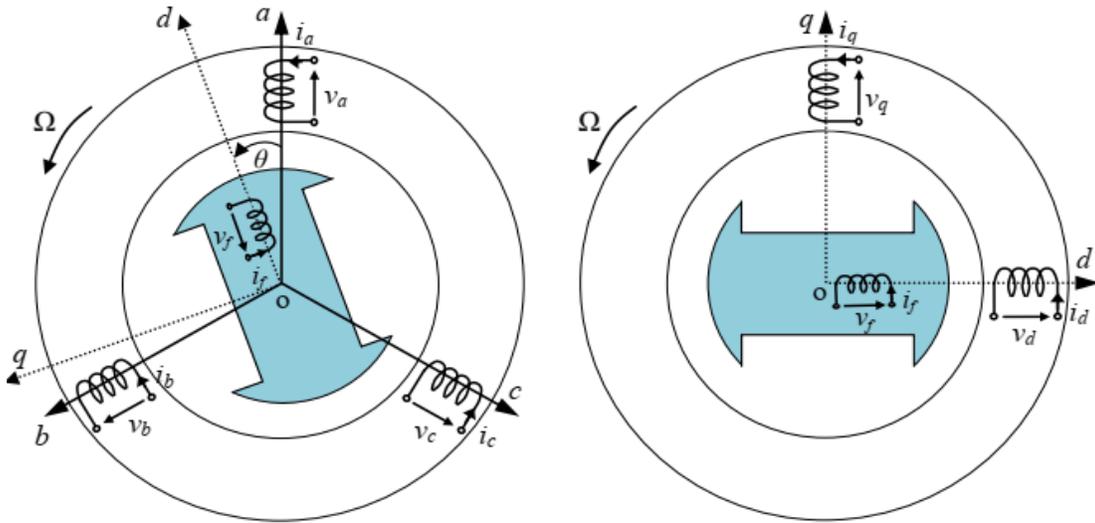
$[L_s] = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_b & M_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_c \end{bmatrix}$  : Matrice inductance du stator.

$[\varphi_{sf}] = [\varphi_{af} \ \varphi_{bf} \ \varphi_{cf}]^t$  : Vecteur flux crée par l'aimant à travers les enroulements statoriques.

### **3.8.2 Modélisation de la MS dans le repère de PARK**

La modélisation utilisée par la transformation de Park dans un repère diphasé lié au rotor

(d, q), permet de voir l'effet des champs tournants, qui offre en effet un certain nombre d'avantages dans la commande du système plus tard.



**Figure 3. 7:** Représentation d’une machine synchrone dans les repères triphasé (abc) et diphasé (dq).

Après la transformation de Park, les équations des tensions de la machine sont données par

$$\begin{cases} v_d = R_s i_d + \frac{d\phi_d}{dt} - \omega \phi_q \\ v_q = R_s i_q + \frac{d\phi_q}{dt} + \omega \phi_d \end{cases} \quad (3-7)$$

$\omega$  : l’angle électrique

Où, et sont respectivement les tensions et les courants statoriques dans le repère d, q. et les flux étant donnés par:  $V_d, V_q, i_d, i_q$ .

$$\begin{cases} \phi_d = L_d i_d + \varphi_{sf} = L_d i_d + M_{sr} I_f \\ \phi_q = L_s i_q \end{cases} \quad (3-8)$$

$L_d$  Et  $L_q$ : sont respectivement l’inductance synchrone longitudinale et transversale  $\varphi_{sf}$  est le flux créée par les aimants du rotor

$M_{sr}$  Étant l’inductance mutuelle entre les enroulements statoriques et rotorique.

$I_f$  Étant le courant d'excitation continu.

- **Equation mécanique**

L'équation mécanique développée par la machine est donnée par la relation suivante :

$$C_M - C_{em} - K_f \Omega = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (3-9)$$

$J$  : Moment d'inertie de la partie tournante (kg.m)

$C_M$  : Couple mécanique de groupe électrogène (c'est un couple moteur en N.m )

$K_f$ : Coefficient de frottement visqueux (N.m.s/rad)

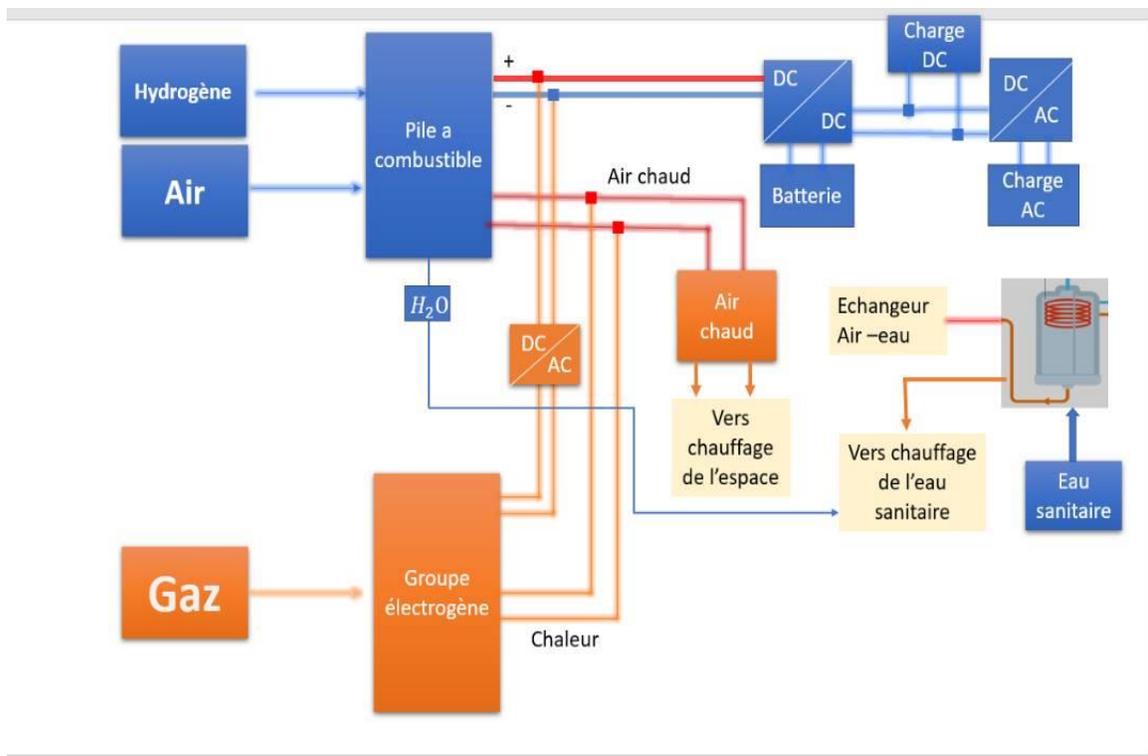
$\Omega$  : Vitesse mécanique (rad/s)

Le couple électromagnétique  $C_{em}$  es donné par :

$$C_{em} = p[(L_d - L_q)i_d i_q + \varphi_{sf} i_q] = p[(L_d - L_q)i_d i_q + \varphi_{sf} M_{sr} I_f i_q] \quad (3-10)$$

### 3.9 Modélisation du système hybride

La modélisation d'un système hybride pile à combustible - groupes électrogènes peut être effectuée en utilisant des outils de simulation tels que MATLAB/Simulink, HOMER ou TRNSYS. Il est important de considérer les différents éléments qui composent le système : pile à combustible, groupe électrogène, batteries et système de contrôle. Chacun de ces éléments peut être modélisé en utilisant des équations électrochimiques ou électromécaniques pour décrire leur comportement. Les algorithmes de contrôle peuvent être développés pour réguler la production d'électricité et la charge/décharge de la batterie. Les simulations permettent d'évaluer les performances et d'optimiser le dimensionnement du système.



**Figure 3. 8:** modélisation de système hybride pile à combustible - groupes électrogènes.

**La pile à combustible** a deux fonctions principales. Tout d'abord, elle produit de l'électricité pour répondre aux besoins énergétiques requis. En parallèle. Elle génère de la chaleur qui peut être utilisée pour le chauffage de l'espace ainsi que pour chauffer l'eau, le tout grâce à des échangeurs.

**Le groupe électrogène** produit de l'électricité qui sera utilisée conjointement avec celle produite par la pile à combustible. Cette combinaison d'électricité est utilisée pour alimenter les points électriques, tandis que la chaleur générée est utilisée pour le chauffage de l'espace.

### **3.10 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons modélisé d'un système électrique hybride comprenant (une pile à combustible, un groupe électrogène et des convertisseurs). Cette modélisation permet de simuler les performances de chaque partie du système hybride et ainsi d'évaluer son efficacité dans l'alimentation d'une charge.

# **CHAPITRE 4**

## **Simulation du système hybride PAC et GE**

# CHAPITRE 4

## Simulation du système hybride PAC et GE

### 4.1 Introduction

Après avoir modélisé les différentes composantes du système hybride dans le précédent chapitre, le travail présenté dans ce chapitre a pour objectif de simuler l'ensemble du système (pile à combustible - groupe électrogène à gaz). Nous allons utiliser Matlab-Simulink pour simuler le système étudié. Les résultats de simulations ont été exposés et discutés.

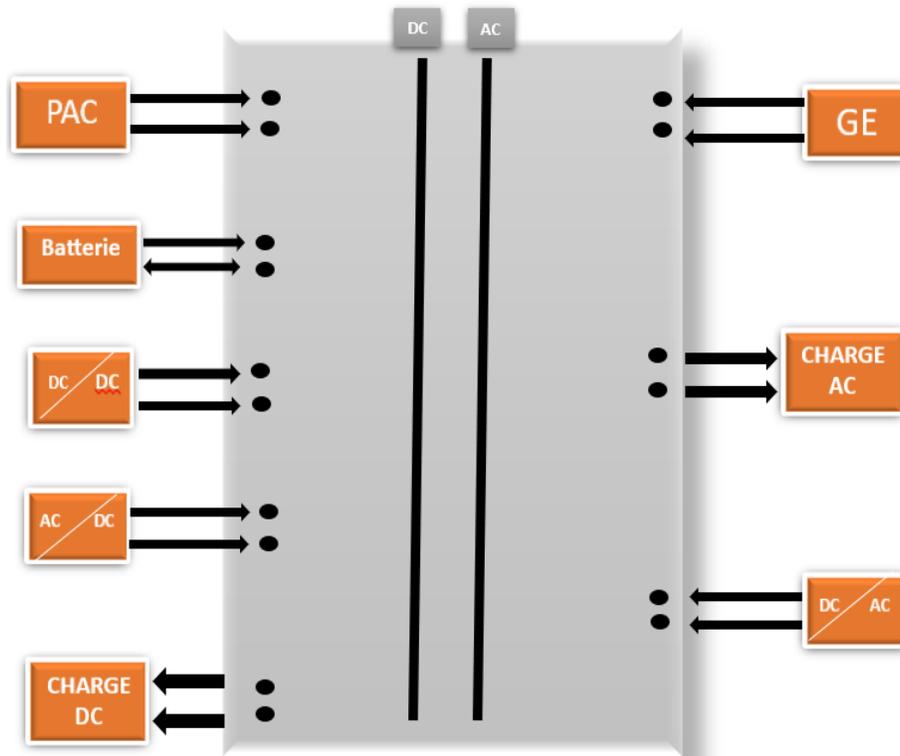
### 4.2 Outil de simulation

Matlab est un logiciel de calcul numérique créé par Cleve Moler dans les années 70 pour offrir aux étudiants un environnement de programmation avancé. sans apprendre le Fortran ou le C. MATLAB, acronyme de "Matrix laboratory", est un langage de programmation dédié au calcul scientifique, à l'analyse de données, à la visualisation et au développement d'algorithmes. Il est utilisé dans de nombreuses disciplines pour la modélisation de systèmes physiques, la simulation de modèles mathématiques, la conception et la validation d'applications. Des boîtes à outils sont également disponibles pour des domaines spécifiques tels que l'Automatique, le traitement du signal, l'analyse statistique et l'optimisation. [49]

### 4.3 Connexion des sources du système hybride

La commande de contrôle, également appelée régulation ou commande automatique, consiste à réguler les variables d'un système afin de maintenir son fonctionnement dans des limites souhaitées. (Figure 4.1) Son objectif est d'assurer la stabilité, la performance et la précision du système en réduisant les erreurs, en minimisant les écarts par rapport à une référence et en atténuant les perturbations externes. La commande de contrôle utilise des capteurs pour mesurer les variables du système, des algorithmes pour analyser ces mesures, et des actionneurs pour ajuster les paramètres du système en conséquence. Elle peut être réalisée à l'aide de différentes techniques telles que la commande PID, la commande prédictive, la commande optimale, la commande floue,

la commande adaptative, la commande par modèle interne, etc. Chaque technique a ses propres avantages, limitations et domaines d'application. A la fin, la commande de contrôle vise à maintenir le système dans des limites souhaitées, en minimisant les erreurs et en réagissant aux perturbations, afin d'atteindre les objectifs de performance spécifiés.

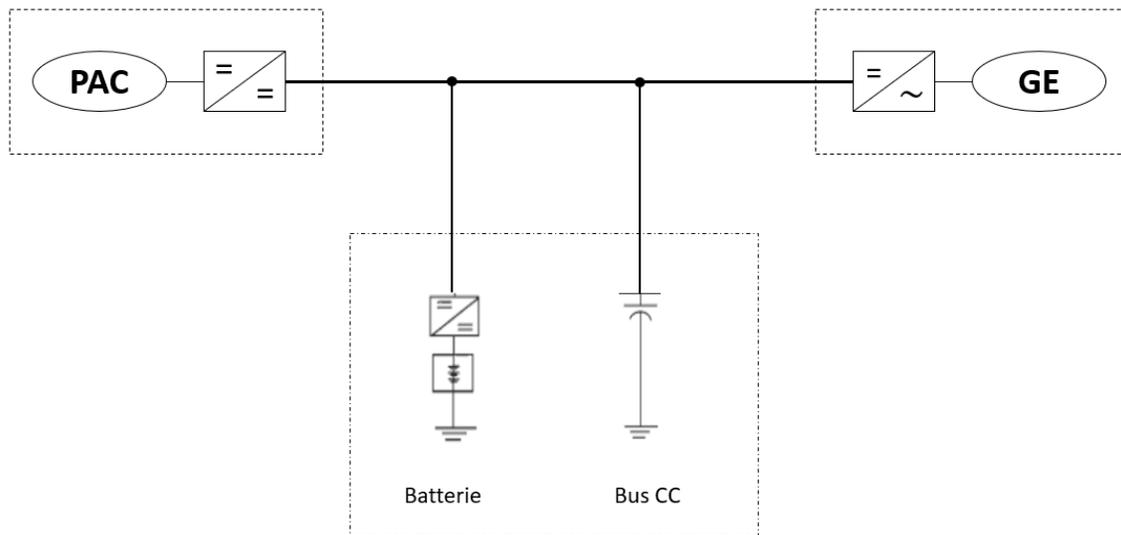


**Figure 4.1:** Schéma de commande de contrôle

Différents schémas de connexion peuvent être utilisés pour connecter une pile à combustible (PAC) à des éléments tels que des batteries, un générateur (GE) et un convertisseur de courant continu. La pile à combustible peut être connectée aux batteries et leur fournir de l'énergie (via le convertisseur de courant continu), dans un système hybride de stockage d'énergie thermique sous forme d'énergie électrique, ce qui permet de l'utiliser ultérieurement lorsque la demande est plus élevée. Elle peut également être connectée à GE et lui fournir de l'énergie (via le convertisseur de courant alternatif), afin de fournir une puissance supplémentaire lorsque la capacité de la pile à combustible seule est dépassée. Enfin, si un convertisseur de courant continu est utilisé, la pile à

combustible peut être directement connectée pour fournir de l'énergie thermique sous forme d'énergie électrique DC.

Si un convertisseur de courant alternatif est utilisé, le générateur peut être directement connecté pour fournir de l'énergie sous forme d'électricité AC.



**Figure 4.2:** Schéma de connexion de PAC aux éléments: batteries, GE,  
Et bus continu

Dans ce schéma de (Figure4.2) typique de connexion d'une PAC (Pile à Combustible) avec des éléments tels que des batteries, des groupes électrogènes gaz (GE) et le bus continu :

Les batteries sont connectées en parallèle avec la PAC pour fournir de l'énergie supplémentaire ou servir de source d'alimentation de secours. Les bornes des batteries sont reliées aux bornes de la PAC. Un système de gestion de batterie (BMS) peut être utilisé pour surveiller et réguler la charge et la décharge des batteries.

Les groupes électrogènes gaz (GE) peuvent être utilisés en combinaison avec la PAC pour fournir de l'électricité supplémentaire lorsque la demande est élevée ou lorsque la PAC ne peut pas

répondre à la charge requise. Les bornes de sortie des GE sont généralement connectées à un panneau de distribution électrique.

Le bus continu est le système électrique principal auquel tous les composants, tels que la PAC, les batteries et les GE, sont connectés. Les bornes de la PAC sont reliées au bus continu, de même que les autres composants.

### 4.4 Schéma Simulink pour la PAC

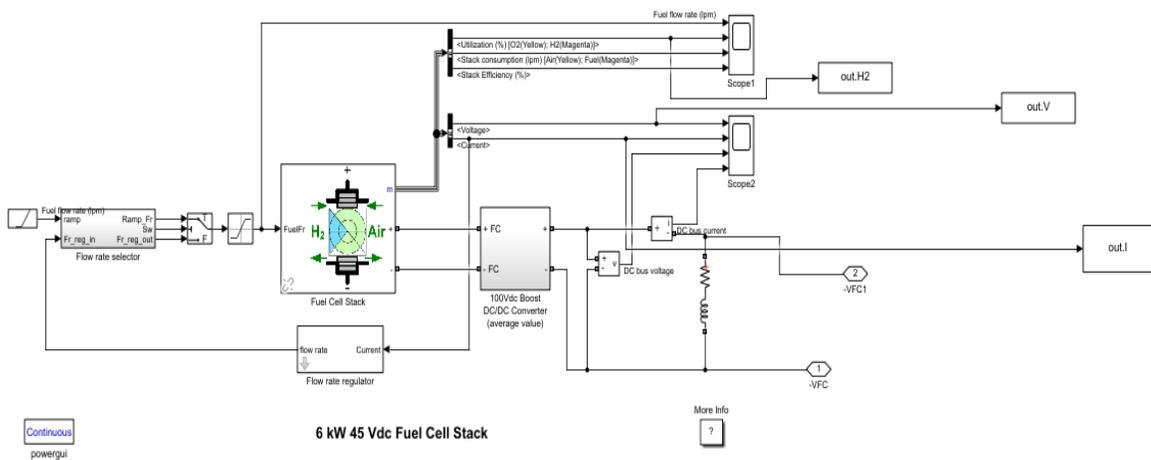


Figure 4.3 : Schéma Simulation de la PAC

### 4.5 Résultats de simulation

Les résultats de la simulation sont présentés dans les figures ci-dessous.

- **Courbe tension -courant**

Les mesures de tension de la pile à combustible effectuées pour différentes variations de courant ont permis de calculer sa puissance. Les résultats obtenus sont présentés dans les Figures (4.4) et (4.5).

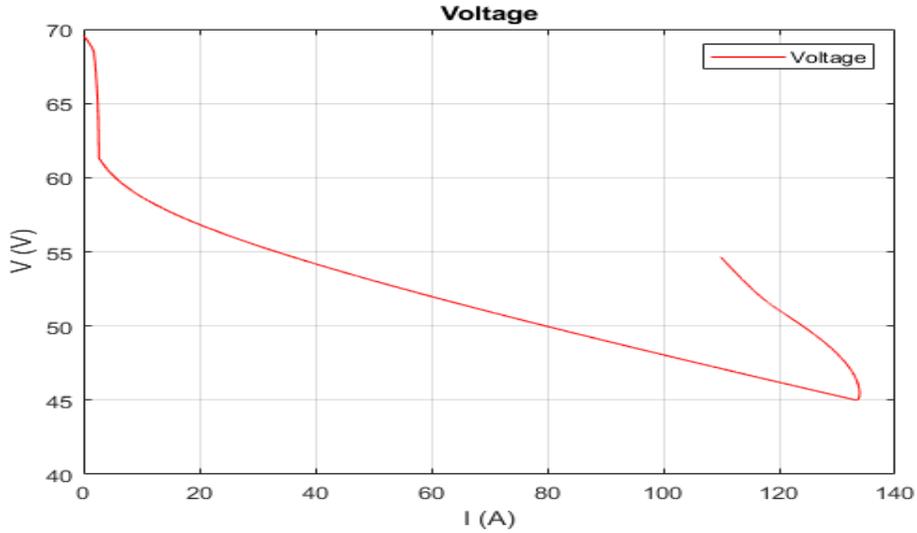


Figure 4.4: Caractéristique Tension /Densité de Courant

La tension en circuit ouvert ( $I = 0$ ) est de 70 V (figure 4.5). Cette réduction est liée aux irréversibilités des réactions électrochimiques, notamment de la réduction de l'oxygène à la cathode. De plus, pour de faibles densités de courant (inférieures à 1A).

▪ La courbe Puissance-Courant

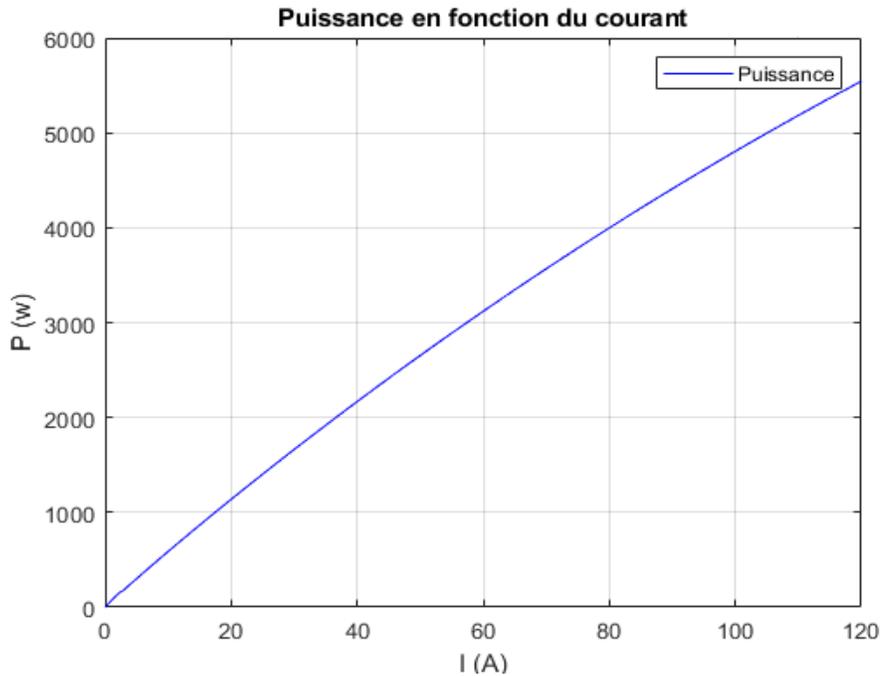


Figure 4.5: Caractéristique Densité de puissance /Densité de Courant

Il est essentiel de tracer la courbe de la densité de puissance en fonction de la densité de courant afin de comprendre les capacités de la pile et d'identifier ses conditions de fonctionnement optimal.

La courbe obtenue présente une forme parabolique, où elle augmente de manière linéaire, atteint un maximum, puis diminue rapidement. Ce comportement peut être expliqué par les relations suivantes :

$$P = U * I$$

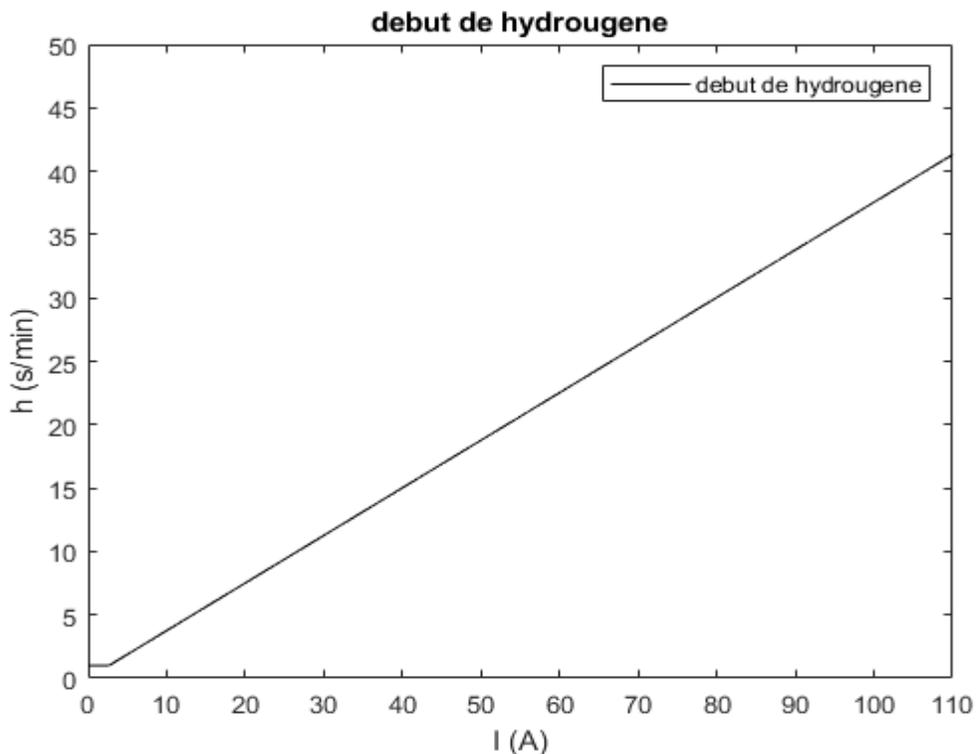
Dans la partie la plus étendue où les polarisations ohmiques prédominent, nous avons :

$$P = U * i$$

$$P = R * i^2$$

Il s'agit de l'équation d'une parabole.

▪ **Courbe Débit H2-courant**



**Figure 4.6:** Caractéristique Début de hydrogène/Densité de Courant

La figure (4.6) illustre que le débit d'hydrogène est directement proportionnel au courant. Nous remarquons qu'une certaine quantité d'hydrogène est produite même en l'absence de charge, ce phénomène étant dû à la différence de pression entre les côtés hydrogène et oxygène.

### 4.6 Schéma Simulink pour la GE

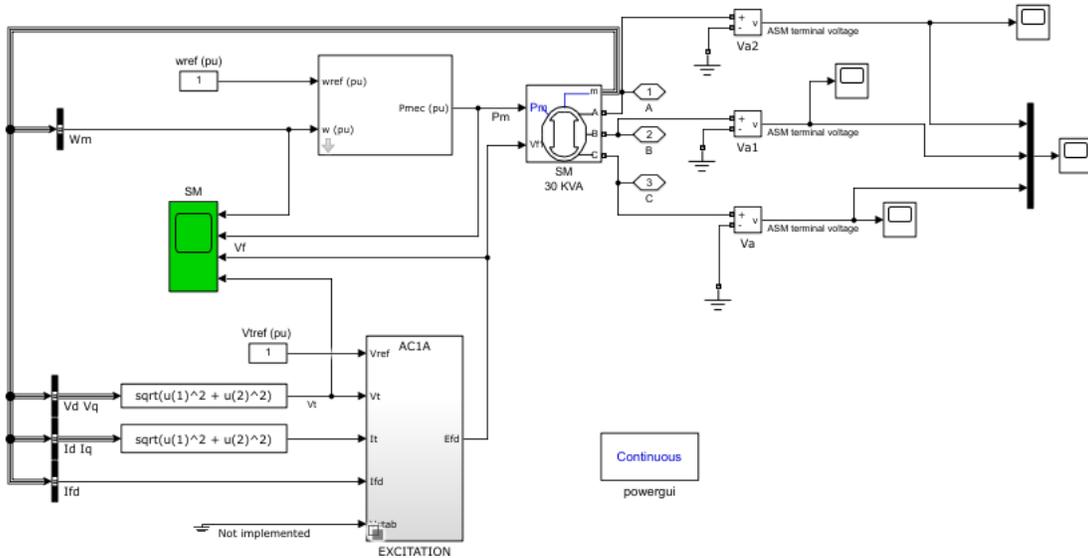


Figure 4.7: Schéma Simulation de GE

### 4.7 Résultats de simulation

Les résultats de la simulation sont présentés dans les figures ci-dessous.

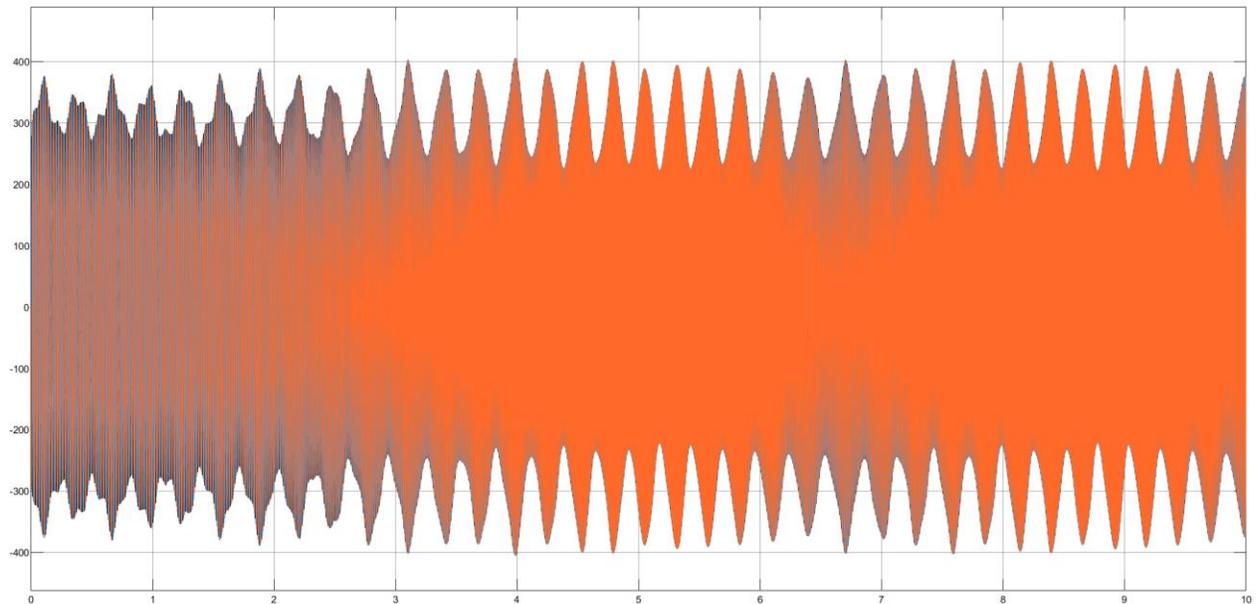
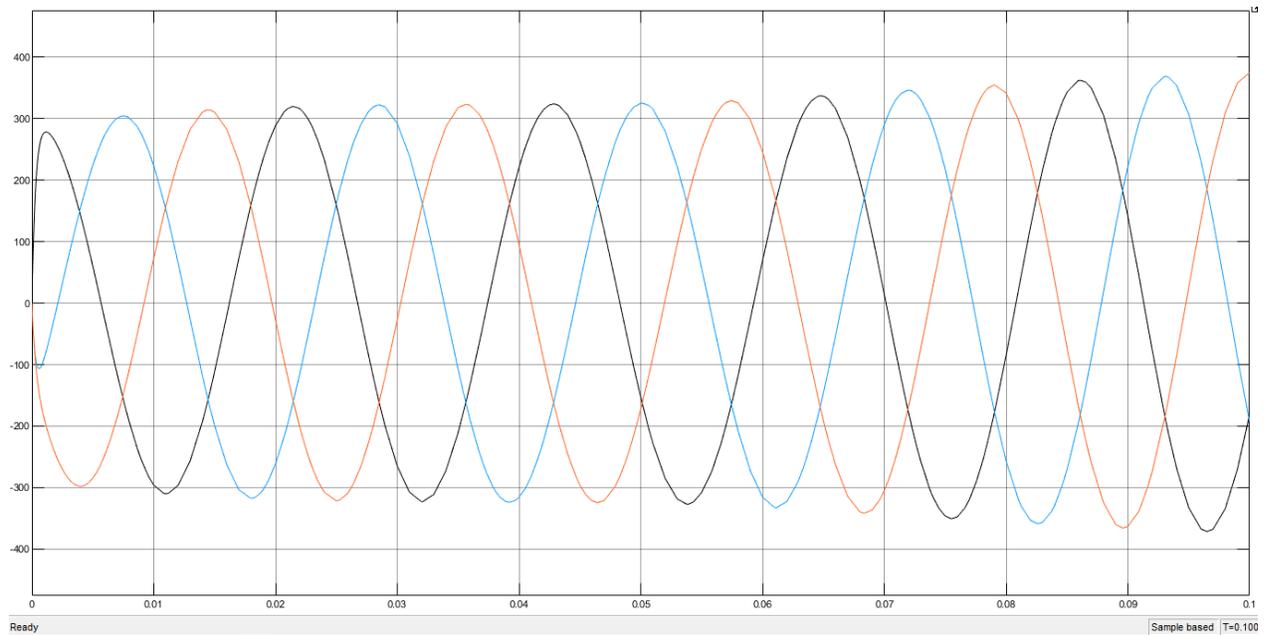


Figure 4.8: Schéma Simulation de GE



**Figure4.9** : Zoom des tensions de la charge du GE

Le régulateur tension joue un rôle crucial car il permet de maintenir la forme sinusoïdale de la tension.

## 4.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous concluons que La simulation du système hybride PAC et GE est un outil pour l'analyse, la conception et l'optimisation des systèmes énergétiques. Elle évalue les performances, aide à prendre des décisions éclairées et optimise l'utilisation de l'énergie thermique et électrique. Cela conduit à une meilleure efficacité énergétique et à une réduction des émissions de gaz à effet de serre.

# **CHAPITRE 5**

**Application du système hybride PAC  
et GE à une Habitation**

## CHAPITRE 5

# Application du système hybride PAC et GE à une Habitation

### 5.1 Introduction

Le dimensionnement des piles à combustibles et des groupes électrogènes est crucial pour garantir leur bon fonctionnement et leur efficacité énergétique dans différents cas d'utilisation, notamment pour fournir de l'électricité dans des zones isolées ou lors d'une panne de courant.

Comme application de ces systèmes, nous avons choisi une application stationnaire. Les besoins énergétiques sont essentiellement de l'électricité et du chauffage/climatisation. Les deux sources vont pouvoir satisfaire ces besoins d'une façon permanente c'est-à-dire du jour comme de nuit, l'hiver et l'été.

### 5.2 Les ressources météorologiques

#### 5.2.1 Situation géographique de l'habitation

Il s'agit d'une maison isolée du réseau électrique, située dans la commune de Zelfana. Les coordonnées géographiques de cette région sont : Latitude : **32.23**. Longitude : **4.13**.

Zelfana est située dans la wilaya de Ghardaïa, au sud Algérien. Elle est située à 665 km au sud de la capitale, Alger. Sa superficie totale est estimée à 2220 kilomètres carrés, avec une altitude de 460 mètres au-dessus du niveau de la mer.

La wilaya de Ghardaïa est limitrophe des wilayas d'El Djelfa et de Laghouat au nord, de El Bayadh et d'Adrar à l'ouest, de Ouargla à l'est et de Tamanrasset au sud.

La maison peut abriter quatre personnes. L'alimentation énergétique de cette maison isolée va être assurée par le système multicouches constitué d'une pile à combustible et d'un groupe électrogène à gaz.

#### 5.2.2 Besoins énergétiques journaliers de la maison

La maison étudiée (figure 5.1) se compose d'un unique étage comprenant deux chambres, une cuisine, un salon ainsi qu'une salle de bain avec des toilettes.

### Les dimensions

- Deux chambres ( $4\text{ m}^2 \times 4\text{ m}^2$ ) totale =  $32\text{ m}^2$
- Le salon ( $4\text{ m}^2 \times 5\text{ m}^2$ ) totale =  $20\text{ m}^2$
- La cuisine ( $4\text{ m}^2 \times 4\text{ m}^2$ ) totale =  $16\text{ m}^2$
- La douche et sanitaire ( $2\text{ m}^2 \times 2\text{ m}^2$ ) totale =  $4\text{ m}^2$
- Le hall ( $3\text{ m}^2 \times 4\text{ m}^2$ ) totale =  $12\text{ m}^2$
- ❖ Totale =  $84\text{ m}^2$  (la figure montre le plan du maison).

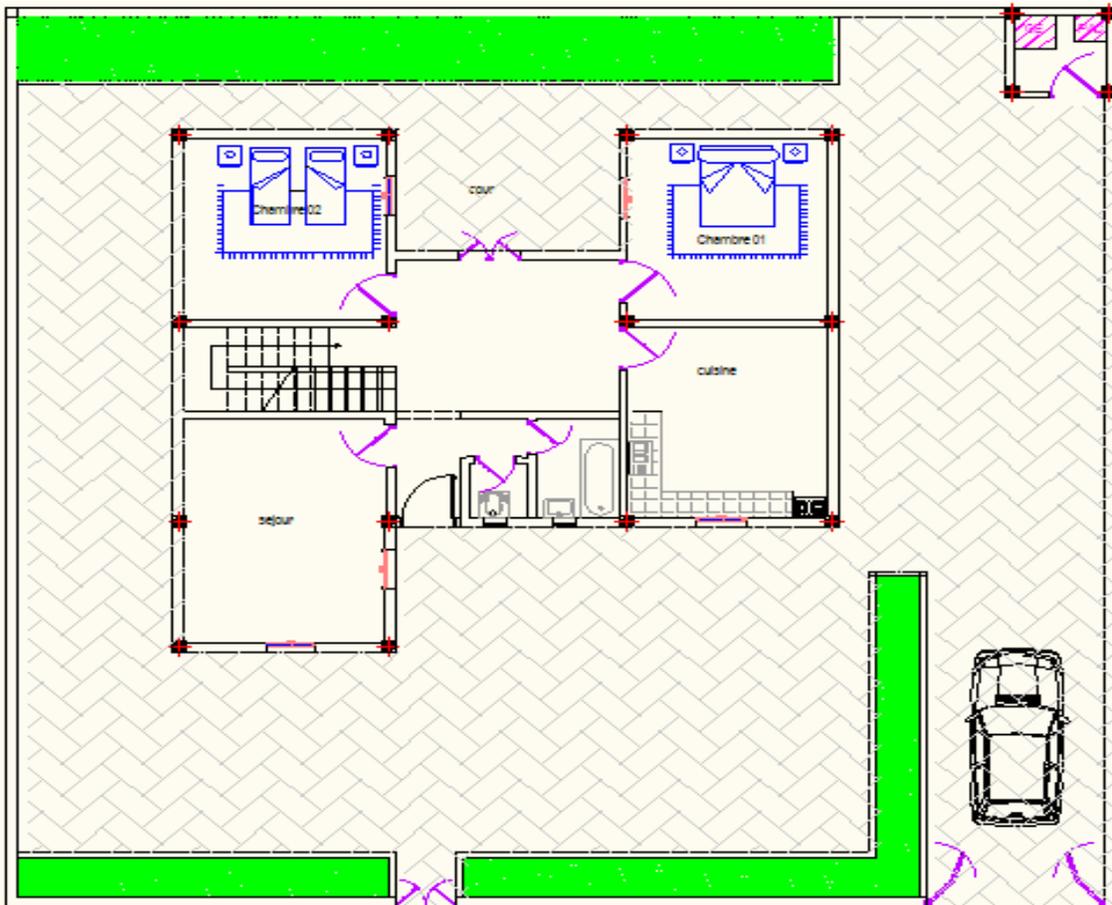


Figure 5. 1: le plan de la Maison.

### 5.2.3 Le profil de charge

Au cours de notre recherche, nous avons proposé la construction d'une maison dans une région non électrifiée, en prenant en compte les aspects du niveau de vie, des traditions, des

comportements et des habitudes en fonction des saisons distinctes : hiver, été et modéré. Par conséquent, nous avons proposé la création d'une maison à faible consommation énergétique qui répond principalement aux besoins énergétiques de base (éclairage, refroidissement, télévision, ventilation) pour un nombre spécifique de chambres qui nécessitent de l'électricité. En outre, nous avons pris en compte les hypothèses suivantes :

La maison sera occupée en permanence toute l'année. Les équipements électriques ont une faible consommation et fonctionnent avec une tension standard de 220 volts - 50 Hz (tension électrique), de sorte que l'utilisateur n'a pas besoin de remplacer les équipements à faible consommation par des équipements de consommation normale. [50]

Dans notre proposition, nous avons considéré l'hiver (S1: décembre, janvier, février) et l'été (S2: juin, juillet, août, septembre, octobre) et modéré (S3: mars, avril, mai, novembre). Les tableaux 5.1 et 5.2 et 5.3 présentent respectivement la consommation d'énergie par heure et par jour pour la période d'été et les périodes d'hiver.

Nous supposons ce qui suit:

- **L'éclairage**

La durée d'éclairage dépend de la durée du jour en fonction des saisons. De plus, dans les régions rurales, les heures de lever et de coucher des habitants sont fortement liées à celles du soleil. Ainsi, dans cette étude, il est supposé que l'éclairage est allumé à 6h du matin pour les deux saisons. En revanche, l'éclairage est éteint à 22h en hiver et à 23h en été.

La puissance moyenne du L'éclairage est supposée égale à 10 W.

- **La réfrigération**

On suppose que la puissance moyenne du réfrigérateur est de 250 W. Le temps de fonctionnement du réfrigérateur est considéré comme étant de 24h/24h pour les deux saisons.

- **Climatiseur (CL) et Ventilateur (V)**

La puissance moyenne du Climatiseur et Ventilateur est supposée égale à 200 W et 45W. Le nombre d'heures de fonctionnement du Climatiseur (CL) et Ventilateur (V) est considéré 6h pour les estival.

- **Télévision(TV)**

On suppose que la puissance moyenne de la télévision est de 100 W. Le temps de fonctionnement de la télévision est considéré comme étant de 6h de l'hiver et 8h de l'été.

- **Four (F)**

On suppose que la puissance moyenne du four est de 2500 W. Le temps de fonctionnement du four est considéré comme étant de 3h pour les deux saisons.

## 5.2.4 Profil de consommation utilisé dans notre étude d'une habitation

### 5.2.4.1 Profile de consommation hivernal

Les charges utilisées dans la saison hivernale concernent les mois de Décembre, Janvier, février

**Tableau 5.1:** profil de consommation hivernal

Type	Nombre	Puissance unitaire (W)	durée d'utilisation (h)	puissance (W)	Energie (Wh)
Éclairage (L)	9	10	8	90	720
télévision(TV)	1	100	6	100	600
Chauffage (CH)	1	1500	6	1500	9000
Four (F)	1	2500	3	2500	7500
réfrigérateur (RE)	1	250	24	250	6000
Machine à laver (ML)	1	2000	2	2000	4000
Pompe (P)	1	75	2	75	150
Téléphone Mobile (T)	2	3	1	6	6
PC portable (PC)	1	65	2	65	130
TOTAL				6586	28106

La charge est constituée de l'éclairage ainsi que les appareils électroménagers.

### 5.2.4.2 Profil de consommation estival

Les charges utilisés dans la saison estivale concernent les mois de Juin, Juillet, Aout, Septembre et octobre.

**Tableau 5.2:** profil de charge estival

Type	Nombre	puissance unitaire (W)	durée d'utilisation (h)	puissance (W)	Energie (Wh)
Éclairage (L)	9	10	7	90	630
télévision(TV)	1	100	8	100	800
Climatiseur (CL)	1	2000	6	2000	12000
Four (F)	1	2500	3	2500	12500
réfrigérateur (RE)	1	250	24	250	6000
Machine à laver (ML)	1	2000	2	2000	4000
Pompe (P)	1	75	3	75	225
Ventilateur (V)	1	45	6	45	270
Téléphone Mobile (T)	2	3	1	6	6
PC portable (PC)	1	65	2	65	130
<b>TOTAL</b>				<b>7131</b>	<b>35931</b>

### 5.2.4.3 Profil de consommation moyenne

Les charges utilisés dans la saison modérée concernent les mois de mars, avril, mai et novembre.

**Tableau 5.3:** profil de charge moyenne

Type	Nombre	puissance unitaire (W)	Durée d'utilisation (h)	Puissance (W)	Energie (Wh)
Éclairage (L)	9	10	8	90	720
télévision(TV)	1	100	8	100	800
Four (F)	1	2500	3	2500	7500
réfrigérateur (RE)	1	250	24	250	6000
Machine à laver (ML)	1	2000	2	2000	4000
Pompe (P)	1	75	2	75	150
Téléphone Mobile (T)	2	3	2	6	12
PC portable (PC)	1	65	2	65	130
<b>TOTAL</b>				<b>5086</b>	<b>19312</b>

## 5.2.5 Profil de consommation énergétique horaire d'une habitation

Tableau 5.4: Profil de consommation horaire d'une habitation.

Semestre Heure	S1: Hivernal	S2 : Estival	S3 : moyenne
01	R=250 (w)	R=250(w)	R=250 (w)
02	R =250(w)	R=250(w)	R =250(w)
03	R=250(w)	R=250(w)	R=250(w)
04	R =250(w)	R=250(w)	R =250(w)
05	R=250(w)	R=250(w)	R=250(w)
06	R+3L+F+CH =4280(w)	R+2L+F=2770(w)	R+2L+F=2770(w)
07	R+ 5L+CH=1800(w)	R+2L=270(w)	R+2L=270(w)
08	R=250(w)	R=250(w)	R=250(w)
09	R+ML+P =2325(w)	R+ML+P=2325(w)	R+ML+P =2325(w)
10	R+ ML+F=4750 (w)	R+ML+F=4750(w)	R+ ML+F=4750 (w)
11	R=250(w)	R=250((w)	R=250(w)
12	R+TV =350(w)	R+TV+CL=2350(w)	R+TV =350(w)
13	R+TV =350(w)	R+TV+CL+P=2425(w)	R+TV =350(w)
14	R =250(w)	R+CL=2250(w)	R =250(w)
15	R=250 (w)	R+CL=2250(w)	R=250 (w)
16	R= 250 (w)	R+CL=2250(w)	R= 250 (w)
17	R+1L+P= 335 (w)	R+CL+P=2325(w)	R+1L+P= 335 (w)
18	R+TV+6L+PC+F+CH=4475(w)	R+TV+V+PC+F=2460(w)	R+TV+PC+F=2460(w)
19	R+TV+6L+PC+T+CH=1978(w)	R+TV+V+2L+PC+T=483(w)	R+TV+2L+PC+T=438 (w)
20	R+TV+4L+T+CH=1893(w)	R+TV+V+3L+T=428(w)	R+TV+3L+T=383(w)
21	R+TV+2L+CH=1870(w)	R+TV+V+3L=425(w)	R+TV+3L=380(w)
22	R+1L=260(w)	R+TV+V+1L=405(w)	R+TV+1L=360(w)
23	R=250(w)	R+TV+V+1L=405(w)	R+TV+1L=360(w)
24	R=250(w)	R=250(w)	R=250(w)
<b>Le jour : Energie total (kWh/j)</b>	27.666 (kWh/j)	30.571 (kWh/j)	18.236 (kWh/j)

- Profil de charge hivernal

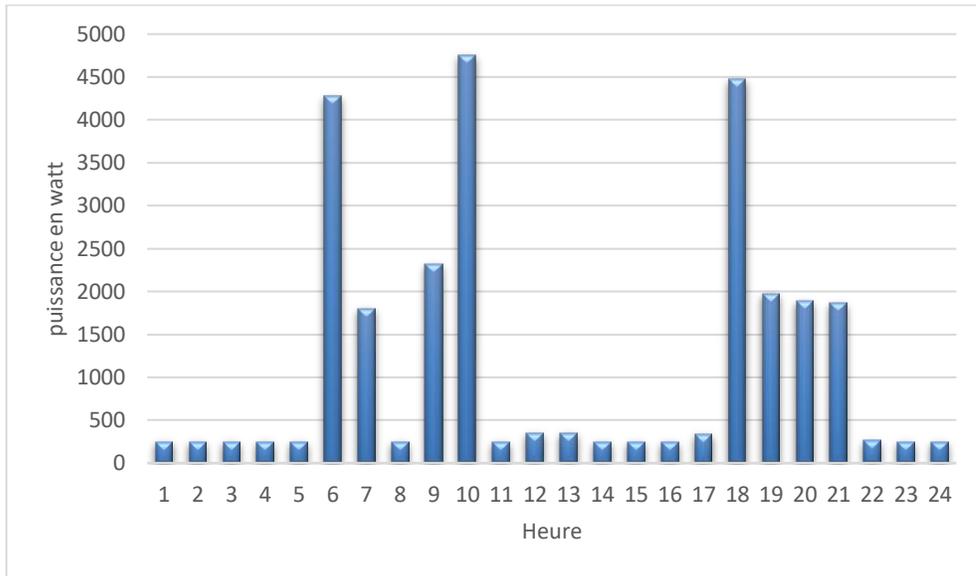


Figure 5. 2: Courbes de profils de charge horaires d’une habitation

- Profil de charge estival

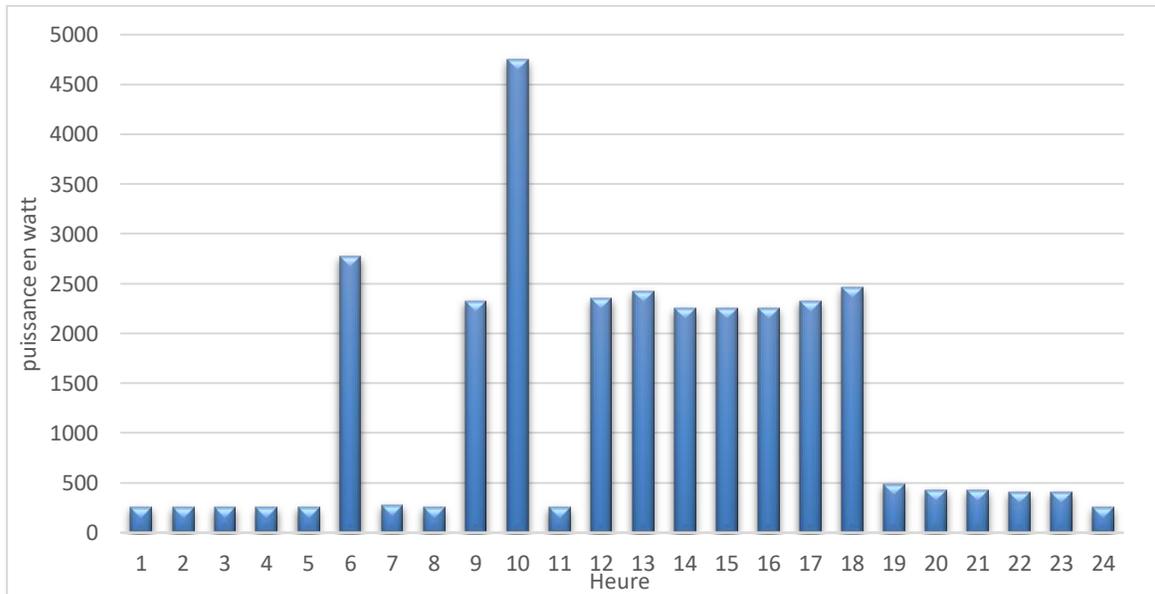
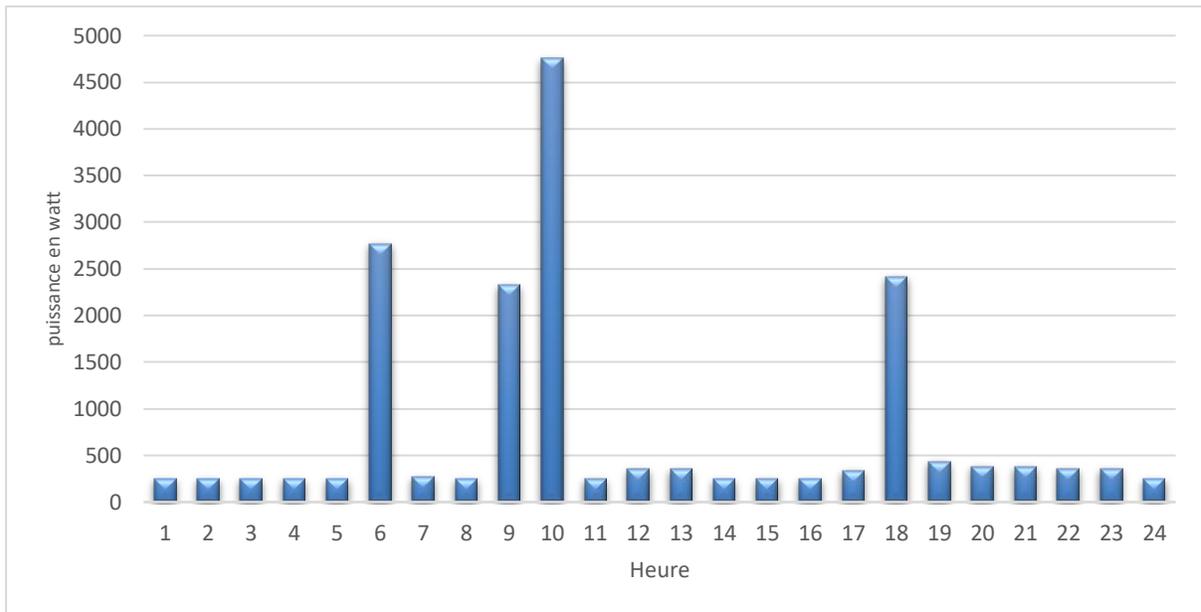


Figure 5. 3: Courbes de profils de charge horaires d’une habitation

- Profil de charge modéré



**Figure 5. 4:** Courbes de profils de charge horaires d'une habitation modéré.

La demande d'énergie est faible pendant [1h-5h], [8h-11h] et [23h-24h] en été et en hiver et [14h-16h] en été, tandis que la consommation est élevée pendant [6h -7h et 9h à 10h et 18h-21h] en hiver et [6h et 9h à 10h et 12h à 18h] en été.

Pendant les périodes [7h, 19h - 23h] en été et de [12h à 13h, 17h et 22h] en hiver, la demande est plus faible. Cependant, la demande journalière en été est plus élevée qu'en hiver, et cela est dû à l'utilisation de la ventilation aux heures les plus chaudes de la journée, notamment entre [12h-17h].

La demande d'énergie est faible pendant [1h-5h et 8h et 11h], [14h-16h] et [24h] en modéré, tandis que la consommation est élevée pendant [6h et 9h - 10h et 18h] en modéré. Pendant les périodes [7h, 12h-13h, et 17h - et 19h-23h] en modéré, la demande est plus faible.

### 5.2.6 Dimensionnement de système hybride

Il est possible de créer un système hybride pour alimenter une maison, avec une pile à combustible pour produire de l'électricité et un générateur électrique en option de secours. En cas de panne de la pile à combustible, le système bascule automatiquement vers le générateur. Le

système peut être conçu pour dépendre principalement de la pile à combustible et utiliser le générateur uniquement en cas de besoin supplémentaire ou de panne. La maintenance régulière et les tests des mesures de secours électriques sont importants pour assurer une alimentation électrique fiable.

### **Dimensionnement de la pile à combustible**

Le dimensionnement d'une pile à combustible pour une maison dépendra de plusieurs facteurs, notamment la puissance électrique requise, la durée de fonctionnement, la consommation électrique moyenne et les coûts d'installation et d'exploitation.

Pour dimensionner correctement une pile à combustible, il est important de connaître la consommation électrique moyenne de la maison ainsi que les périodes de pointe de consommation. Pour la maison la puissance de la pile à combustible est de 6KW.

### **Dimensionnement du groupe électrogène**

Dans le système hybride pour l'électrification une maison isolée, les groupes électrogènes sont utilisés comme appoints pour combler le manque d'énergie. La puissance du groupe électrogène doit être choisie en fonction de la consommation moyenne de la maison, des pics de consommation et des appareils utilisés. Il est important de choisir une puissance nominale supérieure à la consommation moyenne pour éviter des dommages à l'appareil, mais pas trop grande pour éviter une consommation excessive de carburant. La puissance nominale doit également être supérieure à la puissance de pointe et à la puissance de démarrage de certains appareils. Enfin, la puissance fournie au réseau est proportionnelle à la puissance nominale. Pour la maison la puissance du Groupe électrogène est de 8 KW. [63]

### **Sénarios de fonctionnement**

- **S1** : -pile à combustible (jour +nuit)  
- Groupe électrogène (nuit)
- **S2** : -pile à combustible(nuit)

- Groupe électrogène (jour + nuit)
  - **S3:** -pile à combustible (nuit)
    - Groupe électrogène (jour)
  - **S4:** -pile à combustible (jour)
    - Groupe électrogène (nuit)
  - **S5:** -pile à combustible (jour +nuit)
    - Batterie(jour)
  - **S6:** -pile à combustible (jour)
    - Batterie (jour +nuit)
  - **S7:** -pile à combustible (jour)
    - Batterie(nuit)
  - **✓S8:**- pile à combustible + Batterie (jour + nuit)
    - Groupe électrogène ( jour)
  - **S9:**- pile à combustible (nuit)
    - Batterie(jour)
  - **S10:**- pile à combustible (jour)
    - Groupe électrogène ( nuit)
  - **Sénariaux optimal :** est le Sénariaux 8, parce que (pile à combustible + batterie) fonctionne jour et nuit
- ✚ Une génératrice que nous servons seulement en cas de panne (pile à combustible + batterie) dans la journée, et le bruit d'une génératrice dans la journée est quelque peu acceptable.

- ✚ La nuit : il faut l'arrêter pour éviter ce bruit et utiliser la batterie car la maison a besoin de peu d'énergie et de calme.
- ✚ Parce que nous utilisons l'énergie propre et un groupe électrogène qui pollue

**Tableau 5.5:** Profil de consommation annuelle d'une habitation.

Mois	Puissance Consommé en kwh /mois	Hydrogène Consommé en kg	Gaz naturel Consommé en $m^3$
Janvier	857.646	171.5292	85.7646
Février	774.648	154.9296	77.4648
Mars	565.316	113.0632	56.5316
Avril	547.08	109.416	54.708
Mai	947.701	189.5402	94.7701
Juin	917.13	183.426	91.713
Juillet	947.701	189.5402	94.7701
Août	947.701	189.5402	94.7701
Septembre	917.13	183.426	91.713
Octobre	947.701	189.5402	94.7701
Novembre	917.13	183.426	91.713
Décembre	857.646	171.5292	85.7646

**Remarque**

Pour chaque 10kg de  $H_2$  vous produisez 50kw d'électricité

$$\frac{(\text{puissance Consommé}) \times 10}{50} \quad (5-1)$$

Pour chaque  $1m^3$  de gaz naturel vous produisez 10 kWh d'électricité

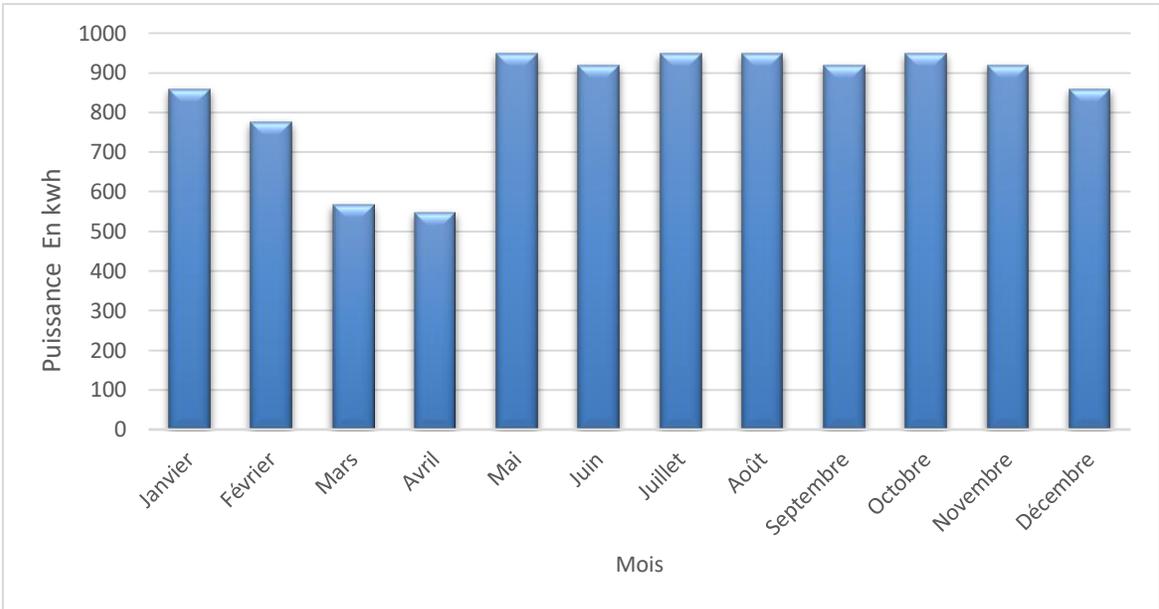


Figure 5. 5: Courbes de profils de charge annuelle d’une habitation

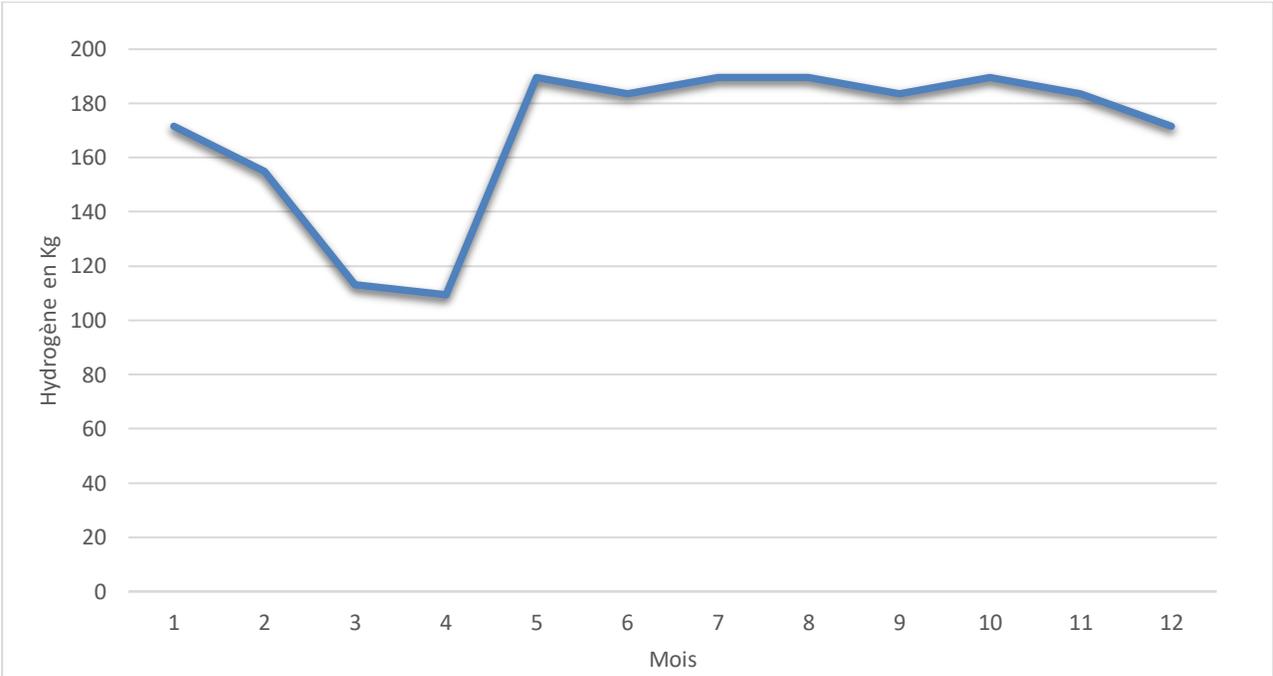
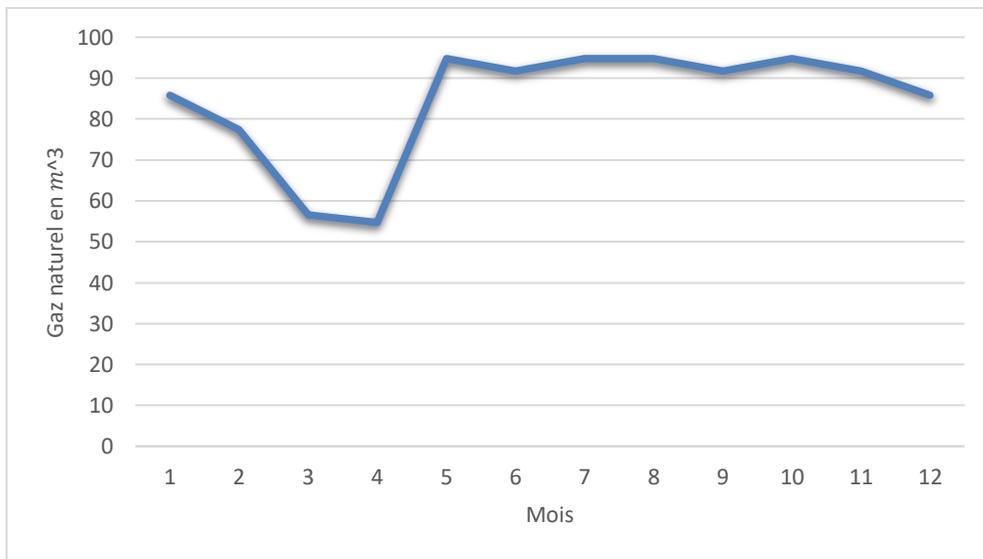


Figure 5. 6: Profil de consommation annuelle d’hydrogène.

Le graphique représente les variations de la consommation d'hydrogène en fonction des mois

On constate une diminution de la consommation d'électricité et donc une diminution de la consommation d'hydrogène pour les mois de février, mars et avril, atteignant la valeur de 109 kW, ainsi que pour les mois de novembre et décembre, atteignant la valeur de 171 kW, en raison de la baisse de la consommation d'énergie en hiver.

Pour les mois de mai, juin, juillet, août, septembre et octobre, la consommation d'électricité atteint la valeur de 189 kW, avec une augmentation considérable de la consommation d'électricité en été en raison d'appareils tels que la climatisation qui consomment beaucoup d'énergie.



**Figure 5.7:** Profil de consommation annuelle à GAZ

Le graphique représente les variations de la consommation gaz naturel en fonction des mois

On constate une diminution de la consommation d'électricité et donc une diminution de la consommation gaz naturel pour les mois de janvier, février, mars et avril, atteignant la valeur de 55 kW, ainsi que pour les mois d'octobre et novembre et décembre, atteignant la valeur de 85 kW, en raison de la baisse de la consommation d'énergie en hiver.

Pour les mois de mai, juin, juillet, août, septembre, la consommation d'électricité atteint la valeur de 95 kW, avec une augmentation considérable de la consommation d'électricité en été en raison d'appareils tels que la climatisation qui consomment beaucoup d'énergie

### **5.3 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté une pile à combustible de dimensions et un groupe électrogène sur une maison isolée, et avons parlé de l'emplacement de la maison (wilaya de Ghardaïa). Nous avons également effectué une étude détaillée du profil de consommation d'été et d'hiver appliqué à la maison et avons conclu que l'utilisation de la pile à combustible pendant la journée et de la batterie la nuit permet d'éviter les pertes d'énergie.

En général, l'utilisation de piles à combustible dans les maisons peut être économiquement et écologiquement viable, mais cela nécessite une étude détaillée du profil de consommation d'électricité dans chaque environnement et région.

# **Conclusion Générale**

## **Conclusion Générale**

L'étude et la conception d'un système hybride Pile à combustible/Groupe électrogène à gaz pour une habitation ont montré que cette solution peut être efficace pour répondre aux besoins énergétiques d'une habitation de manière fiable et durable.

Ce système permet de combiner l'utilisation d'une source d'énergie renouvelable, la pile à combustible, avec une source d'énergie de secours, le groupe électrogène à gaz. L'utilisation d'une pile à combustible pour produire de l'électricité en continu permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques, tout en assurant une source d'énergie stable et fiable. Le groupe électrogène à gaz, quant à lui, permet de pallier aux fluctuations de la demande d'énergie et de fournir une source d'énergie de secours en cas de besoin. Cependant, il est important de souligner que la conception d'un tel système doit être réalisée avec soin, en prenant en compte les besoins énergétiques spécifiques de l'habitation et en choisissant des équipements de qualité pour assurer la fiabilité et la durabilité du système.

À la fin, l'étude et la conception d'un système hybride Pile à combustible/Groupe électrogène à gaz pour une habitation peuvent constituer une solution efficace pour répondre aux besoins énergétiques d'une habitation de manière fiable et durable. Cependant, cela nécessite une planification minutieuse et une mise en œuvre appropriée pour garantir le bon fonctionnement du système sur le long terme.

# **Bibliographies**

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] - livret –l energie.Conception et réalisation : Spécifique - Photo de couverture : © Photo Disc  
– Illustrations : YUVANOE 2002.
- [2] - SALMI. D, RABHI. F, 2017 ‘ Modélisation de la consommation d’électricité basse tension en Algérie (1980-2014)’, mémoire de master, Université Bejaia
- [3] - laurence serra, “barrieres a l’implantation de projets d’energie renouvelable dans les communautes hors reseau des regions nordiques canadiennes", memoire de magister, universite sherbrooke, canada, (2011).
- [4] - akkouche.n, ouchiha.m,’ l’investissement dans les énergies renouvelables en algerie’, memoire master, universite abderrahmane mira de bejaia, 2020.
- [5] - HATTI. M, 2010,’ Contribution à l’Étude des Systèmes Hybrides Photovoltaïque / Pile à Combustible’, memoire Doctorat, Université d’Oran
- [6] - LAOUAR. M, BECHENEB. I, 2019,’ Estimation du Rayonnement Solaire par Deux Modèles Semi-Empiriques (LACIS & HANSEN, DAVIES & HAY) dans le site de Ghardaïa’, MEMOIRE MASTER, Université Ghardaïa
- [7] - Dr. Rezig Mohamed, 2020/2021, ‘Energies et Environnement’, Département Génie Electrique, 2 ème Année ST – (Génie Électrique), Université de Mohamed Khider
- [8] - CHABANI zeyneb ; "La part des énergies renouvelables dans le bilan énergétique national à l’horizon 2030", Mémoire de magister, Université M’Hamed Bougara-Boumerdes, 2014
- [9] - KHADRAOUI .Z, 2017,’ Etude d’une centrale solaire thermique’, MEMOIRE MASTER, UNIVERSITE ANNABA
- [10] - AZIZI.A,’Modélisation optimisation D’un système de production d’énergie photovoltaïque avec un système de stockage hybride’, mémoire doctorat, Université d’Annaba, 2019.

- [11] - Dr. ZEGAOUI.Abdallah, 'Conversion Photovoltaïque', Faculté de Sciences & technologie \_ Université de Ghardaïa, 2021/2022
- [12] - BIDI .M, 2019 'Conception d'une centrale photovoltaïque pour recharge de voitures', MEMOIRE MASTER, Université de M'sila.
- [13] - Faiza Bouaïcha, 2019,' Simulation de l'effet des paramètres climatiques (température, poussière et éclairage) sur le rendement d'une cellule solaire', memoire master, Université Oum El Bouaghi.
- [14] - Site web: [www.explorateurs-energie.ch](http://www.explorateurs-energie.ch),10/02/2023
- [15] - Guerdouh.Z, Tebba.A, 2020,'Asservissement d'un panneau solaire', memoire master, Université de Jijel.
- [16] - CHENINA.F, BOUTEBBA.A, 2022,' Réalisation D'un Circuit De Commande D'un Convertisseur DC/DC Pour Extraire Le Maximum D'énergie D'un Générateur Photovoltaïque', MEMOIRE MASTER, Université Ghardaïa.
- [17] - DJELLOUT. M, DJAROUM.B,' Conception et réalisation d'un système de démarrage automatique d'un groupe électrogène à base d'une carte Arduino', Mémoire de master, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 2018.
- [18] - Vijay Ramani, 'Fuel Cells', The Electrochemical Society Interface, spring 2006, page 41.
- [19] - Anuj Bhatia,' Introduction to Fuel Cells', Continuing Education and Development, Inc. P: (877) 322-5800, Course No: R07-001,info@cedengineering.com.
- [20] - Sylvaine PIQUE, 31/01/2017,' PILE À COMBUSTIBLE STATIONNAIRE : CONTEXTE REGLEMENTAIRE ET NORMATIF INTERNATIONAL ET NATIONAL RISQUES POTENTIELS'.
- [21] - HADDAD.A,' Modélisation dynamique non linéaire de la pile à combustible du type PEM : Application à la régulation de l'humidité dans la membrane électrolytique', memoire doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, Année 2009.

- [22] - D. Timoté, L. Zoé et V. Raphaël, G. Mathilde, 'pile à combustible et applications', 10/06/2018
- [23] - Alaa adnan rashad, Enas a rashad, Evon akram, Ali a ali, 'hydrogen in fuel cells: an overview of promotions and demotions' department of chemistry, college of science, al-nahrain, pp5-6, 2017.
- [24] - BELKACEM BOUZIDA SIHEM, ' Etude des phénomènes des écoulements des gaz dans les canaux dans une pile à combustible de type PEMFC', Mémoire de magister en physique, Université Batna, 2011.
- [25] - JEMEIS, ' Modélisation d'une pile à combustible de type PEM par réseaux de neurones', thèse doctorat, université de franche comte.
- [26] - AZZI. H, 2016, ' Etude et modélisation d'une pile à combustible', Mémoire de master, Université de Béjaia.
- [27] - LACHICHI.A, 2005, ' Modélisation et stabilité d'un régulateur hybride de courant - Application aux convertisseurs pour pile à combustible', thèse de doctorat, l'Université de Franche-Comté en Génie électrique.
- [28] - MANSOURI. A, MANSOURI. K, 2022, ' Etude et simulation des performances des piles à combustible à hydrogène dans des applications statiques et dynamiques', Mémoire de master, Université Ouargla.
- [29] - SAISSET.R, 'Contribution à l'étude systémique de dispositifs énergétiques à composants électrochimiques', THÈSE doctorat, DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE, 2004.
- [30] - Aissaoui, Benzetta.A, ' Etude et simulation d'un convertisseur DC- DC pour les applications véhicule électrique' Mémoire de magister, Université de Biskra, 2022.
- [31] - MOHAMEDI. A, 2021, ' Amélioration des performances d'une source de tension à base d'une pile à combustible à l'aide d'un réglage PI', mémoire master, Université Mohamed Seddik Ben Yahia - Jijel.

- [32] - SAKER.S, 'Modélisation et Contrôle du système, Pile à Combustible, Convertisseurs et Super condensateur', Mémoire de master, Université Biskra, 2013.
- [33] - BELKHIRI. Z, 2010,' Etude Et Analyse De La Gestion De L'eau Dans Une Pile A Combustible A Membrane Echangeuse De Protons (PEMFC)', Mémoire de master, Université de Batna.
- [34] - SALLEMINE. H, LACEFAR. M, 2020,' Modélisation de la Pile à Combustible de type PEMFC', Mémoire de master, Université de Biskra.
- [35] - BREQUE.F, 2008,' modélisation du transport de masse dans une pile à combustible de type pem et étude de l'humidification interne de la pile', thèse de doctorat, l'Université du Québec A Trois-Rivières.
- [36] - Aliane. Ch, Zerioul.A,' Etude d'un groupe électrogène par simulation numérique', Mémoire de master, UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 2016.
- [37] - BOUCHEMLA. H, BOUSLI. B, 2017, 'Etude du fonctionnement et l'élaboration d'un plan de maintenance préventive et curative du groupe électrogène de la centrale thermique de Jijel', Mémoire de mastèr, universite mohamed seddik ben Yahia- Jijel.
- [38] - LEHZIEL. M, BAGAA. M, 2021,' La détection et la maintenance des capteurs dans le groupe électrogène Volvo', Mémoire de master, Université Ghardaïa
- [39] - LADJALI. N,' Etude AMDEC et mise en place d'un planning de maintenance préventive \_ Application sur un groupe électrogène 300KVA Cas : l'entreprise nationale l'ENIEM', Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2022.
- [40] - KHOUF.H,' Etude et conception d'une carte de gestion d'un groupe électrogène à base d'un microcontrôleur', Mémoire de master, Université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2015.
- [41] - DAHEUR .M, TAINI Souheil. A.E,' Etude et simulation du système hybride PV/ Pile à combustible/Batterie ', Mémoire master, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA,2020.

- [42] - FADLOUN.F, BELKADI.N,' Modélisation d'un système énergétique hybride (Photovoltaïque + Batterie)', Mémoire de master, université Larbi ben m'hidi Oum-el-bouaghi, 2010.
- [43] - TRAORÉ.A, juillet 2016,' gestion d'un système autonome hybride photovoltaïque éolien pour applications agricoles', mémoire présenté à l'université du québec à trois-rivières, université du québec.
- [44] - TIAR Mourad,' Gestion Optimale D'énergie d'une Chaîne de Production Electrique Renouvelable', Thèse Doctorat, Université de Biskra, 13 / 04 /2017.
- [45] - Mr. BENMESSAOUD.M,' système d'énergie hybride pv-sofc Étude de cas de réalisation stationnaire à l'usto', thèse de doctorat, université des sciences et de la technologie - Mohamed boudiaf- oran, 2012.
- [46] - THOUNTHONG.P,' conception d'une source hybride utilisant une pile à combustible et des super condensateurs', thèse de doctorat, L'Institut National Polytechnique de Lorraine, 2005.
- [47] - KOURMA.A, LAICHE FOUZI.A,' Simulation et gestion du flux énergétique d'un système hybride autonome (photovoltaïque/ pile à combustible)', Mémoire de master, université ibn khaldoun de tiaret, 2022.
- [48] - Djellouli.T,' Commande des systèmes ', Département Automatique et Electromécanique Master 2 Energies Renouvelables, Université de Ghardaïa, 2020/2021.
- [49] - KEBE.A,' Contribution au pré dimensionnement et au contrôle des unités de production d'énergie électrique en site isolé à partir des énergies renouvelables : Application au cas du Sénégal', thèse de doctorat, université paris-sud, 21 Novembre 2013.
- [50] - ZERROUKI.O,'Dimensionnement d'un système hybride photovoltaïque-groupe électrogène avec batterie pour alimenter un villageau sud d'Algérie (ilamane)', Mémoire de master, université Saada Dahleb blida-1 faculté de technologie, septembre 2017.