

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE EPOPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA



Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Electrique

Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique industrielle

Présenté par :

AIMEN BEN ABDALLAH

ABBAS ABDESSLAM

Thème :

**Gestion d'Energie d'un Système Hybride «Générateurs
PV /Piles à Combustible / Batteries »**

Devant le jury composé de :

Dr Bouali Khadidja

MCA(UKM Ouargla)

Président

Mr Taibi Djamel

MAA(UKM Ouargla)

Examineur

Mr Benaouadj Mahdi

MCB(UKM Ouargla)

Encadreur/rapporteur

Année universitaire 2022/2023



Remerciements

Avant tout, nous remercions ALLAH le Tout-puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail dans des meilleures Conditions.

On tient tout d'abord à remercier notre encadreur **BENAOUADJ Mahdi**, pour sa contribution et son aide particulière qui nous ont été indispensables pour la réalisation de ce travail ainsi que toutes ces remarques constructives qui nous ont permis d'approfondir nos connaissances scientifiques.

De même nous remercions tous les professeurs de **génie électrique** qui nous ont enseigné tout au long de la période universitaire.

Sans oublier, de remercier le jury qui nous a fait l'honneur d'avoir évalué ce travail.

Enfin, dans ces dernières lignes on tient à remercier nos parents, et tous nos proches, pour les conseils et les encouragements qu'ils nous ont toujours prodigués ainsi que pour leur soutien tant moral que financier

Est Merci encore à tous...



Dédicaces

Avant tout, nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Nous dédions ce modeste travail :

A nos très chers parents, que Dieu les protège pour leur support moral et financier, pour les encouragements et les sacrifices qu'ils ont faits a nos familles.

A nos professeurs. A tous les amis (es) d'études.



Abréviations

SEH : Systèmes d'énergies hybrides

PV : Photovoltaïque

PAC : Pile à combustible

SHER : Systèmes d'énergies hybrides renouvelables

DC : Courant continu

AC : Courant alternative

CC : Courant continu

N_{PVS} : Nombre des panneaux PV en série

V_{coNS} : Somme des tensions en circuit ouvert de N_s cellules en série

I_{ccNS} : Courant de court-circuit de N_s cellules en série

I_{cc} : Courant de court-circuit des cellules photovoltaïques

V_{co}: Tension du circuit ouvert des cellules photovoltaïques

I_{ccN_p}: Somme des courants de court circuit de (N_p) cellule en parallèle

N_{PVP} : Nombre des panneaux PV en parallèle

V_{coN_p} : Somme des tensions en circuit ouvert de N_s cellules en parallèle

q : Charge de l'électron ($q = 1,602.10^{-19}$ [C])

K : Constante de Boltzmann ($k = 1,38.10^{-23}$ [J/°K])

T_q : Température de la cellule [°K]

P_{PV}: Puissance mesurée aux bornes de la cellule PV

P_m : Puissance maximum d'une cellule photovoltaïque

V_{comod}: Tension en circuit ouvert du module [V]

PAFC: Pile à combustible à acide phosphorique,

MCFC: Pile à combustible à carbonate fondu,

(KOH) : L'hydroxyde de potassium,

ΔG_f: Énergie libre de Gibbs [KJ.mol⁻¹]

ΔG_f⁰: Énergie libre de Gibbs à la pression et température standards. À : 1 bar et 25 °C,

ΔG_f⁰ = - 237,2 KJ.mol⁻¹

R : constante universelle des gaz. $R = 8,31451 \text{ J.Kg}^{-1} \cdot \text{k}^{-1}$

T : température exprimée en Kelvin

P_{H2} : Pression d'hydrogène [bar]

P_{H2}: Pression d'oxygène [bar]

P_{H2O}: Pression de la vapeur d'eau [bar]

F : Constante de Faraday (96 485 coulombs) qui représente la charge électrique d'une mole d'électrons

Ni-Cd : Nickel-Cadmium (en anglais)

Ni-Mh : Nickel-métal hydride (en anglais)

Li-ion : Lithium-ion (en anglais)

Li-Po : Lithium-ion polymer (en anglais)

E_P: Energie journalière à produire [en Wh/j]

E_j: Besoins journaliers [en Wh/j]

T_e : Nombre d'heures d'éclairage équivalentes par jour [en h/j]

H_{min} : Irradiation journalière [en kWh/m²/j]

P_c : Puissance crête des panneaux PV [en Wc]

P_{c1} : Puissance crête d'un seul panneau [en Wc]

V_f: Tension de fonctionnement de l'installation [en V]

V_{PPm}: Tension des panneaux PV au point de puissance maximale [en V]

S_{tot} : Surface totale des panneaux installés

C_n: Capacité nominale des batteries [en Ah]

CVS : Convertisseur statique

EDC_{ba}: État de charge stack des batteries

V_n: Tension nominale [en V]

D : Profondeur de décharge [en %]

P_{ba} : Puissance du stack de batteries

P_{pv} : Puissance de la source photovoltaïque

P_{fc} : Puissance du stack de piles à combustible

Résumé :

Une gestion efficace de l'énergie est un aspect essentiel du fonctionnement d'un système énergétique hybride. L'objectif principal de la gestion de l'énergie est de répondre aux besoins énergétiques à tout moment, en respectant les différentes contraintes opérationnelles.

Cette thèse porte sur la gestion de l'énergie dans un système hybride autonome comprenant une source photovoltaïque (source principale), des piles à combustible et des batteries lithium-ion (sources auxiliaires). L'objectif de ces travaux est de maîtriser les flux d'énergie d'une charge totalement autonome en satisfaisant ses besoins énergétiques tout en optimisant la durée de vie du système de stockage.

Mots clés : Système hybride autonome, Panneau photovoltaïque, Pile à combustible, Batterie lithium-ion, Gestion d'énergie.

Abstract:

Efficient energy management is an essential aspect of the operation of a hybrid energy system. The main objective of energy management is to meet energy needs at all times, respecting the various operational constraints.

This thesis focuses on energy management in an autonomous hybrid system comprising a photovoltaic source (main source), fuel cells and lithium-ion batteries (auxiliary sources). The objective of this work is to control the energy flows of a fully autonomous load by satisfying its energy needs while optimizing the service life of the storage system.

Keywords: Autonomous hybrid system, Photovoltaic panel, Fuel cell, Lithium-ion battery, Energy management.

ملخص:

تعد الإدارة الفعالة للطاقة جانباً أساسياً من تشغيل نظام الطاقة الهجين. الهدف الرئيسي لإدارة الطاقة هو تلبية احتياجات الطاقة في جميع الأوقات ، مع احترام القيود التشغيلية المختلفة.

تركز هذه المذكرة على إدارة الطاقة في نظام هجين مستقل يضم مصدراً كهروضوئياً (المصدر الرئيسي) وخلايا الوقود وبطاريات الليثيوم أيون (المصادر المساعدة). الهدف من هذا العمل هو التحكم في تدفقات الطاقة لحمل المستقل بالكامل من خلال تلبية احتياجاته من الطاقة مع تحسين عمر خدمة نظام التخزين.

الكلمات المفتاحية: نظام هجين مستقل ، لوحة كهروضوئية ، خلية وقود ، بطارية ليثيوم أيون ، إدارة الطاقة

Table des Matières

Table des Matières

<i>Introduction générale</i>	2
------------------------------------	---

Chapitre I : Production et Stockage d’Energie Electrique par le Système Hybride : Générateurs PV / Piles à Combustible / Batteries

I.1. Introductio	5
I.2. Généralités sur les énergies renouvelables	5
I.3. Les avantages d’énergies renouvelables	6
I.4. Généralités sur les systèmes d’énergie hybrides.....	6
I.4.1. Classifications Des systèmes d’énergie Hybrides	6
I.4.1.1. Les régimes de fonctionnement du système Hybride	6
I.4.1.2. La structure du système hybride	7
I.4.2. Configurations de bus dans les systèmes hybrides	7
I.4.2.1. Architecture à bus DC.....	7
I.4.2.2. Architecture à bus à courant alternatif (AC).....	8
I.4.2.3. Architecture mixte à bus (DC/AC)	8
I.5. Production de l’énergie électrique photovoltaïque.....	8
I.5.1. L’énergie solaire.....	8
I.5.2. Historique sur l’énergie solaire photovoltaïque.....	9
I.5.3. Les avantages et les inconvénients l’énergie solaire PV	9
I.5.3.1. Les avantage de l’énergie solaire photovoltaïque	9
I.5.3.2. les inconvénients de l’énergie solaire photovoltaïque.....	9
I.5.4. Cellule photovoltaïque:	9
I.5.5. Différents types des cellules photovoltaïques	10
I.5.5.1. La cellule photovoltaïque en silicium monocristallin.....	10

I.5.5.2. La cellule photovoltaïque en silicium Poly cristallin.....	11
I.5.5.3. La cellule au silicium Amorphe.....	11
I.5.6. Les avantages et les inconvénients de chaque cellule	12
I.5.6.1. La cellule photovoltaïque en silicium monocristallin.....	12
I.5.6.2. La cellule photovoltaïque en silicium poly cristallin.....	12
I.5.6.3. La cellule au silicium amorphe.....	12
I.5.7. Le générateur photovoltaïque:.....	12
I.5.7.1. Regroupement des cellules	12
I.5.7.1.1. Regroupement en série.....	13
I.5.7.1.2. Regroupement en parallèle	13
I.5.7.1.3. Regroupement (série et parallèle).....	14
I.5.7.2. Fonctionnement électrique d'un générateur photovoltaïque.....	14
I.5.7.2.1. Courant de court-circuit <i>I_{cc}</i>	14
I.5.7.2.2. Tension de circuit-ouvert <i>V_{co}</i>	15
I.5.7.2.3. Puissance maximal <i>P_{max}</i>	15
I.5.7.3. Facteur de forme, FF.....	16
I.5.7.4. Le rendement.	16
I.6. Production de l'énergie électrique par des piles à combustible	16
I.6.1. Technologie des piles à combustible.....	16
I.6.2. Historique de développement des piles à combustible.....	16
I.6.3. Fonctionnement	17
I.6.4. Composants de la pile à combustible	18
I.6.5. Les réactions	19
I.6.6. Types de piles à combustible.....	20
I.6.7. La pile à combustible à membrane électrolyte polymérique (PEMFC).....	21
I.6.8. Tension à vide.....	22

I.6.8. Le Rendement.....	23
I.7. Le stockage d'énergie.....	24
I.7.1. Définition.....	24
I.7.2. Différents types de batteries	24
I.7.2.1. Lithium-Ion (Li-ion)	24
I.7.2.2. Nickel métal-hydrure (NiMH)	24
I.7.2.3. Nickel Cadmium (NiCd).....	24
I.7.2.4. Exigences sur les Batteries Solaires.....	25
I.7.3.Synthèse et caractéristiques	25
I.8.Conclusion	26

***Chapitre II : Dimensionnement et Modélisation du Système Hybride :
Générateurs PV/ Piles à Combustible / Batteries***

II.1. Introduction.....	29
II.2. Dimensionnement d'un Système hybride autonome	29
II.2.1. Cahier des charges.....	29
II.2.2. Dimensionnement d'un Système hybride	30
II.2.2.1. Dimensionnement de la source photovoltaïque.....	30
II.2.2.1.1. Détermination du nombre des panneaux PV en série/parallèle	31
II.2.2.1.2. Calcul du nombre la surface totale des panneaux installées.....	32
II.2.2.1.3. Éclairement sur la ville d'Ouargla.....	33
II.2.2.2. Dimensionnement du stack de piles à combustible	34
II.2.2.3. Dimensionnement des batteries lithium-ion	34
II.2.2.4. Dimensionnement des convertisseurs continu/continu (hacheurs).....	36
II.2.2.4.1. Convertisseur DC-DC lié aux panneaux PV	36
II.2.2.4.2. Convertisseur DC-DC lié aux piles.....	37

II.2.2.4.3. Convertisseur DC-DC lié aux batteries	37
II.3. Modélisation du système hybride autonome.....	38
II.3.1. Modélisation de l'éclairage.....	38
II.3.2. Modélisation de la source PV	39
II.3.3. Modélisation du comportement du stack de piles à combustible.....	45
II.3.3.1. Pertes ohmiques.....	46
II.3.3.2. Pertes d'activation	46
II.3.3.3. Pertes de concentration.....	47
II.3.3.4. Expression de la tension aux bornes d'une cellule à pile à combustible de type PEM en fonction du courant débité.....	47
II.3.3.5. Expression de la tension aux bornes du stack de piles à combustible PEM en fonction du courant débité	48
II.3.4. Modélisation des batteries lithium-ion.....	48
II.3.5. Modélisation du fonctionnement des convertisseurs statiques (hacheurs)	50
II.4. Conclusion.....	52

Chapitre III : Gestion d'Énergie du Système Hybride : Générateurs PV/ Piles à Combustible / Batteries

II.1. Introduction.....	54
III.2. Stratégies de gestion du système hybride d'énergie	54
III.3. Architecture du système hybride (Pac, source photovoltaïque et batteries).....	54
III.3.1. Structure du système hybride autonome.....	56
III.4. Stratégie de la gestion d'énergie.....	56
III.5. Principe de la gestion d'énergie	56
III.6. Résultats de simulation	59
III.7. Résultats de simulation et discussion	60

III.7.1 Puissances des sources d'énergie et la charge.	60
III.7.2. Puissances du système	60
III.7.3. Courants du système	62
III.7.4. Tensions du système	63
III.8. Conclusion	65
Conclusion générale	67
Références bibliographiques.....	69

Liste des figures

Chapitre I : Production et Stockage d'Énergie Électrique par le Système Hybride : Générateurs PV / Piles à Combustible / Batteries

Figure I.1: Les différents types d'énergies renouvelables	5
Figure I.2 : Architecture d'un système hybride à bus continu	7
Figure I.3 : Architecture d'un système hybride à bus alternatif.....	8
Figure I.4 : Configuration du système hybride à bus mixte (AC/DC)	8
Figure I.5 : Structure de la cellule photovoltaïque	10
Figure I.6 : formes des cellules solaires	10
Figure I.7 : Cellules monocristallines.....	11
Figure I.8 : Cellules Poly cristallines.....	11
Figure I.9 : Cellule Photovoltaïque amorphe.....	12
Figure I.10 : Caractéristique d'un groupement de n cellules identiques en série.....	13
Figure I.11 : Caractéristique d'un groupement de n cellules identiques en parallèle.....	14
Figure I.12 : Caractéristique résultante d'un groupement hybride de cellules identiques	14
Figure I.13 : Puissance maximum d'une cellule PV	15
Figure I.14 : Expériences de William Grove «gas batteries»	17
Figure I.15 : Principe de fonctionnement d'une pile à combustible.....	19
Figure I.16 : Schéma de principe d'une pile à combustible de type PEM(PEMFC).....	22

Chapitre II : Dimensionnement et Modélisation du Système Hybride : Générateurs PV/ Piles à combustible / Batteries

Figure II.1 : Configuration du système hybride autonome.....	30
Figure II.2 : Convertisseur Boost lié aux panneaux PV	36

Figure II.3 : Convertisseur Boost lié au stack de PEM	37
Figure II.4 : Montage Buck/Boost du convertisseur DC-DC lié au stack de batteries lithium-ion.	37
Figure II.5 : Rayonnement journalier à différents moments de la journée dans le mois de janvier ..	39
Figure II.6 : Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque	39
Figure II.7 : Caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$ du module PV AEG-40 dans les conditions standard.	41
Figure II.8 : Caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$ du module AEG-40 dans les conditions standard	42
Figure II.9 : Influence de l'éclairement sur les caractéristiques $P_{pv} = f(V_{pv})$ du module PV AEG-40	42
Figure II.10 : Influence de l'éclairement sur les caractéristiques $I_{pv} = f(V_{pv})$ du module PV AEG-40.....	43
Figure II.11 : Influence de température ambiante sur la caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$ du module PV AEG-40	43
Figure II.12 : Influence de température ambiante sur la caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$ du module PV AEG-40	44
Figure II.13 : Caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$ de la source PV	44
Figure II.14 : Caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$ de la source PV	45
Figure II.15 : Caractéristique (densité de courant/tension) d'une pile PEM	48
Figure II.16 : Modèle R-C série d'une batterie lithium-ion	49
Figure II.17 : Montage Boost du convertisseur DC-DC connecté à la source PV	50
Figure II.18 : Montage Boost du convertisseur DC-DC connecté au stack de piles	50
Figure II.19 : Montage Boost du convertisseur DC-DC connecté au stack de batteries	50

Chapitre III : Gestion d'Energie du Système Hybride : Générateurs PV /Piles à Combustible / Batteries

Figure III.1 : Schéma du raccordement des sources et consommateurs énergétiques.....	55
Figure III.2 : Structure du système hybride autonome étudié	56

Figure III.3 : Diagramme priorité d'alimentation	56
Figure III.4 : Sens des flux énergétique.....	57
Figure III.5 : Puissances des sources d'énergie et la charge	60
Figure III.6 : Puissance de la source PV et sa référence.....	60
Figure III.7 : Puissance du stack de piles à combustible et sa référence	61
Figure III.8 : Puissance du stack de batteries en fonction de temps.....	61
Figure III.9 : Courant de la source PV et sa référence	62
Figure III.10 : Courant du stack de piles à combustible et sa référence.....	62
Figure III.11 : Courant du stack de batteries et sa référence	63
Figure III.12 : Tension du stack de piles à combustible.....	63
Figure III.13 : Tension du stack de batteries	64
Figure III.14 : Etat de charge du stack de batteries	64

Liste des tableaux

Chapitre I : Production et Stockage d’Energie Electrique par le Système Hybride : Générateurs PV /Piles à combustible / Batteries

Tableau I.1 : Différents types de piles à combustible.....	20
Tableau I.2 : Différents types des batteries	25
Tableau I.3 : Principales données techniques des accumulateurs au lithium-ion.....	26

Chapitre II : Dimensionnement et Modélisation du Système Hybride : Générateurs PV / Piles à combustible / batteries

Tableau II.1 : Consommations électriques journalières de l’habitation considérée.....	29
Tableau II.2 : Tension de fonctionnement recommandée	32
Tableau II.3 : Caractéristiques du panneau PV AEG-40.....	33
Tableau II.4 : Caractéristiques de la source PV	34
Tableau II.5 : Valeurs du rayonnement solaire journalier dans le mois de janvier	39
Tableau II.6 : Types des convertisseurs DC-DC associés aux sources d’énergie	51

Chapitre III : Gestion d’Energie du Système Hybride : Générateurs PV Piles à Combustible / Batteries

Tableau III.1 : Paramètres du système hybride autonome.....	58
Tableau III.2 : Voici les résultats obtenus avec l'outil "Matlab/Simulink"	59

Introduction générale

Introduction générale

Actuellement, la plupart des gisements énergétiques sont exploités pour produire de l'électricité. L'abondance du charbon et son faible prix sont devenus exploités à l'échelle mondiale dans la production d'électricité, suivie par le gaz naturel et les centrales nucléaires, et certains pays produisent de l'électricité en exploitant des barrages et des rivières. Et les chercheurs dans le monde entier travaillent avec assiduité pour changer l'ancienne vision de la production d'énergie et exigent des sources modernes de production d'énergie, à savoir l'énergie solaire et l'énergie éolienne.

En raison de l'augmentation annuelle de la démographie, les énergies renouvelables sont devenues une alternative aux ressources fossiles, mais l'énergie solaire parfois devient incapable de répondre aux besoins de la société en raison de sa dépendance totale à des facteurs qu'elle ne contrôle pas comme la chaleur et le rayonnement solaire. C'est pourquoi la meilleure solution est de combiner plusieurs sources capables de produire plus d'énergie, pour assurer la continuité d'approvisionnement quoi qu'il arrive, comme les conditions climatiques et météorologiques, comme les systèmes multi-sources ou les systèmes hybrides.

Les nouvelles solutions technologiques offertes par les générateurs hybrides, même si elles sont très complexes par rapport aux solutions de source existantes, sont particulièrement intéressantes en raison de leur flexibilité inégalée par rapport aux solutions de source unique. Cependant, ces solutions nécessitent des dimensionnements a priori laborieux basés sur des connaissances approfondies des ressources énergétiques renouvelables sur site, mise en œuvre en amont, gestion rigoureuse de l'énergie électrique produite [1].

Le système hybride, que nous étudierons au cours de ce travail, combinera trois sources d'énergie, qui sont des panneaux solaires et des piles combustibles et des batteries électriques. Ce système hybride sera relié à une maison afin qu'elle lui fournisse une énergie électrique suffisante tout au long de la journée et dans toutes les conditions météorologiques possibles [2].

Dans ce contexte, nous préparerons ce mémoire pour l'étude et la gestion des énergies renouvelables dans un système électrique hybride (SEH). Ce mémoire peut être divisé en trois chapitres.

Dans le premier chapitre, nous donnerons une description générale des différents systèmes d'alimentation hybrides, de leurs différents composants et structures, ainsi que des concepts des différentes sources qui composent ce système.

Dans le deuxième chapitre, nous étudierons les dimensions et la modélisation d'un système hybride et la représentation de chaque composant par son modèle mathématique.

Dans le troisième chapitre de ce mémoire, nous étudierons la gestion et le fonctionnement de la puissance du système d'alimentation hybride photovoltaïque et des piles combustibles et des batteries à l'aide du programme MATLAB / Simulink, en tenant compte du volume quotidien de production d'énergie électrique, du volume quotidien de consommation de charge tout au long de la journée et des éventuelles conditions extérieures pouvant affecter la production.

***Chapitre I : Production et Stockage
d'Énergie Électrique par le Système
Hybride : Générateurs PV/ Piles à
combustible / Batteries***

I.1. Introduction

Au fil du temps, le coût des énergies traditionnelles a augmenté, et d'autre part, leurs ressources ont diminué, incitant le monde à se tourner vers les énergies vertes, comme les énergies renouvelables, d'abord parce qu'elles sont disponibles globalement et en quantités appropriées, et d'autre part d'autre part, ils ne polluent pas l'environnement.

Dans ce chapitre, nous discutons des systèmes multi-sources en général, puis discutons plus en détail des principaux composants de notre complexe hybride : la source photovoltaïque, les piles de combustible et le système de stockage.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous étudions le mode de fonctionnement du photovoltaïque et des piles à combustible, et nous étudions le choix des éléments de stockage adaptés à relier aux sources photovoltaïques et aux piles à combustible [3].

I.2. Généralités sur les énergies renouvelables

Aujourd'hui, le monde assiste à une mutation majeure et fondamentale des systèmes de production d'électricité, La libéralisation du marché de l'électricité de l'énergie fossile a conduit à l'émergence de nouveaux moyens et méthodes de production appelés énergies renouvelables.

Les énergies renouvelables sont une source illimitée et disponible à la demande. Grâce à ces énergies propres, nous pouvons produire une énorme quantité d'énergie et sont plus respectueuses de la nature que les énergies fossiles, ainsi que disponibles en quantité appropriée partout dans le monde et de manière libre [4].



Figure 1.1 : Les différents types d'énergies renouvelables [5]

I.3. Les avantages d'énergies renouvelables [6]

- Les conséquences atmosphériques possibles des énergies renouvelables ne sont pas graves et peuvent être facilement résolues par rapport aux énergies traditionnelles (nucléaire ou pétrole).
- L'élimination des systèmes de production d'énergie renouvelable est facile, peu coûteuse et rapide.
- Les énergies renouvelables sont naturellement disponibles.
- Il ne produit pas de gaz à effet de serre.

I.4. Généralités sur les systèmes d'énergie hybrides

Au cours des dernières années, de nombreuses études ont été menées pour résoudre la conception et le développement de systèmes hybrides d'énergie renouvelable et leur contrôle, et les processus de développement doivent se poursuivre dans le domaine des énergies renouvelables, de l'énergie solaire, de l'énergie éolienne et du reste. Des autres sources en faisant un usage idéal.

Les énergies vertes et durables sont considérées comme respectueuses de l'environnement, contrairement aux sources d'énergie traditionnelles. Cependant, l'inconvénient de ces sources renouvelables demeure qu'elles dépendent entièrement des conditions météorologiques. En raison de ce caractère aléatoire de ces sources, les chercheurs ont dû passer à l'hybridation, qui combine plus de deux ou plusieurs sources d'énergie renouvelables différentes. Ainsi, la technologie hybride contribue à la génération d'une énergie stable tout au long de la journée [3].

I.4.1. Classifications Des systèmes d'énergie Hybrides [7]

De nombreuses classifications sont effectuées selon les critères appropriés dans ce qui suit à condition que les catégories les plus répondues soient.

I.4.1.1. Les régimes de fonctionnement du système Hybride

Les systèmes hybrides sont divisés en deux groupes. Dans le premier groupe, nous constatons que les systèmes hybrides fonctionnent en parallèle avec le réseau électrique qui est connecté au réseau. Les systèmes hybrides du deuxième groupe fonctionnent de manière indépendante du réseau électrique pour répondre aux besoins du citoyen dans les zones agricoles telles que les villages et les zones rurales.

1.4.1.2. La structure du système hybride

Deux critères peuvent être pris en compte dans le classement selon la structure du système.

Le premier critère est la disponibilité ou l'indisponibilité d'une source d'énergie normale, cette source d'énergie traditionnelle peut être un générateur diesel ou une turbine à gaz.

Le deuxième critère est la disponibilité ou l'indisponibilité d'un système de stockage d'énergie pour répondre à la demande en l'absence de source primaire et ce système peut être des batteries, des électrolyseurs, des serveurs, des volants d'inertie...etc.

1.4.2. Configurations de bus dans les systèmes hybrides [8]

Un système d'énergie renouvelable hybride est constitué de deux ou plusieurs sources d'énergie électrique telles que des panneaux photovoltaïques et une pile à combustible, ainsi que d'équipements d'électronique de puissance et d'équipements de stockage. Trois architectures se distinguent parmi les SHER, à savoir

- ➔ Architecture à bus DC.
- ➔ Architecture à bus AC.
- ➔ Architecture mixtes à bus DC-AC.

1.4.2.1. Architecture à bus (DC)

Dans la figure suivante, toutes les sources de sortie sont connectées au bus de courant continu (CC) via des transducteurs. L'alimentation CC (PV, batterie) est connectée aux hacheurs CC/CC.

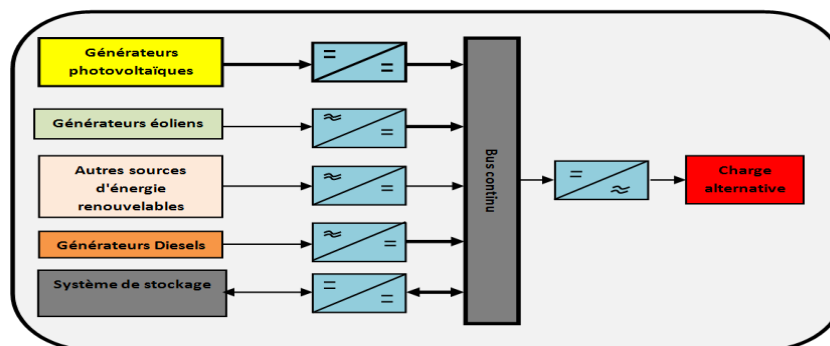


Figure I.2 : Architecture d'un système hybride à bus continu

I.4.2.2 Architecture à bus à courant alternatif (AC)

Dans la figure (I.3), les éléments du système hybride sont connectés au bus AC.

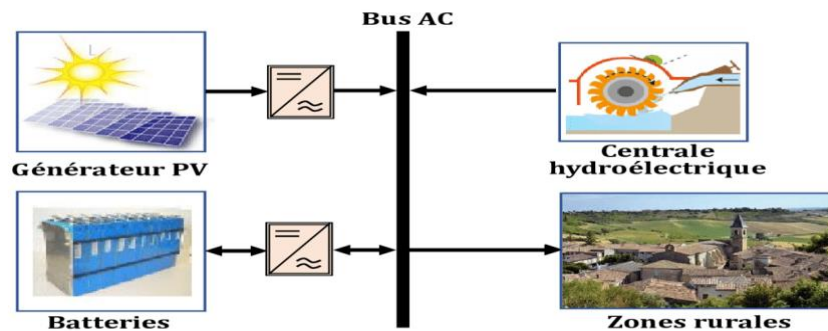


Figure I.3 : Architecture d'un système hybride à bus alternatif

I.4.2.3. Architecture mixte à bus (DC/AC)

La figure suivante représente la structure d'un système hybride Ce système fournit du courant continu ou alternatif à travers un convertisseur bidirectionnel qui convertit DC-AC et AC-DC.

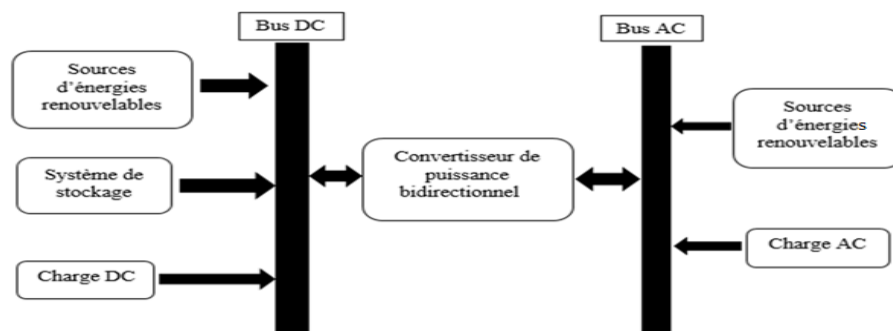


Figure I.4 : Configuration du système hybride à bus mixte (AC/DC)

I.5. Production de l'énergie électrique photovoltaïque

I.5.1. L'énergie solaire

L'énergie solaire est une source inépuisable d'énergie électrique, et nous ne pouvons pas directement bénéficier de cette énergie Parce qu'elle doit être transformée en d'autres formes d'énergies plus utiles

- ➔ En bénéficiant directement du rayonnement solaire (énergie passive).
- ➔ En utilisant la chaleur du rayonnement solaire (énergie thermique).

→ En transformant le rayonnement solaire en électricité grâce à des cellules Photovoltaïques (énergie photovoltaïque).

I.5.2. Historique sur l'énergie solaire photovoltaïque [9]

L'énergie solaire photovoltaïque est apparue pour la première fois en 1838 par le scientifique français Alexandre Edmond Becquerel en expérimentant une batterie électrolytique avec des électrodes de platine et en se rendant compte que lorsqu'il est exposé au soleil, le courant augmente. De là était le début de l'énergie solaire photovoltaïque.

Des années plus tard, le scientifique William Grylles Adams du Natural Philosophé Collège du Kings Collège de Londres et l'un de ses étudiants ont exposé du sélénium à la lumière pour produire de l'électricité. Au cours de cette expérience, il a créé la première cellule photovoltaïque.

Au cours de l'année 1953 découvre Calvin Fuller et Gerald Pearson et Daryl Chaplin Silicium solaire Cette cellule était capable de produire suffisamment d'énergie électrique pour faire fonctionner de petits appareils électriques, et cette cellule était d'une grande importance.

La première apparition des cellules solaires sur le marché remonte à 1956, et l'utilisation de ces cellules est devenue très importante après que leur prix ait baissé de 80% au cours des années 1970.

I.5.3 Les avantages et les inconvénients l'énergie solaire PV

I.5.3.1 Les avantage de l'énergie solaire photovoltaïque

- Énergie renouvelable et inépuisable
- L'électricité peut être produite grâce à l'énergie solaire dans de nombreux endroits

I.5.3.2 les inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque

- Le coût élevé des panneaux solaires
- Parfois, il est inutile en raison de sa dépendance à la chaleur

I.5.4. Cellule photovoltaïque [10]

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui convertit la lumière solaire en électricité. Elle utilise des semi-conducteurs pour générer un courant électrique directement à partir

du rayonnement solaire. La tension produite par une cellule photovoltaïque peut varier entre 0,3 V et 0,7 V, en fonction de facteurs tels que le matériau utilisé, la température et l'âge de la cellule.

La figure I.5 suivante montre la structure de la cellule photovoltaïque.

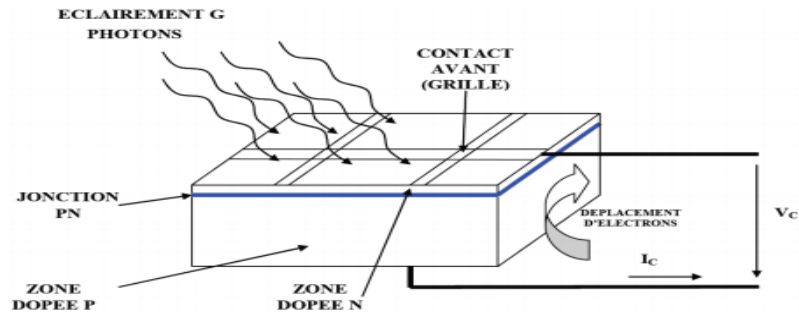


Figure I. 5 : Structure de la cellule photovoltaïque

I.5.5. Différents types des cellules photovoltaïques [10]

Les cellules solaires en silicium cristallin sont les plus largement utilisées, et les cellules solaires sont souvent de forme circulaire ou carrée, et l'utilisation du silicium est due à ses propriétés cristallines et à une disposition idéale des atomes.

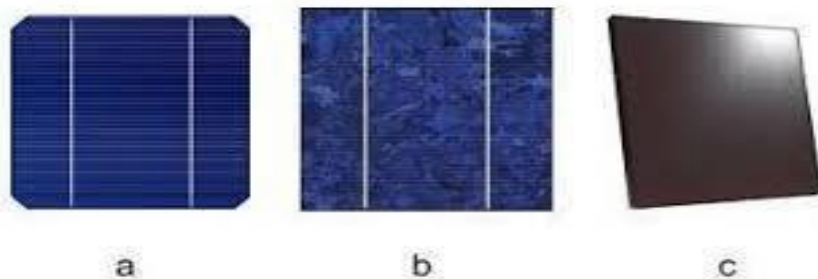


Figure I. 6 : Formes des cellules solaires

I.5.5.1. La cellule photovoltaïque en silicium monocristallin

Les panneaux solaires monocristallins sont largement utilisés pour alimenter les maisons et les réseaux publics. Le silicium monocristallin est obtenu en refroidissant du silicium fondu pour former un cristal uniforme. Ces panneaux solaires ont une couleur bleue distinctive et une excellente efficacité pour convertir la lumière du soleil en électricité. Comme le montre la figure I.7.

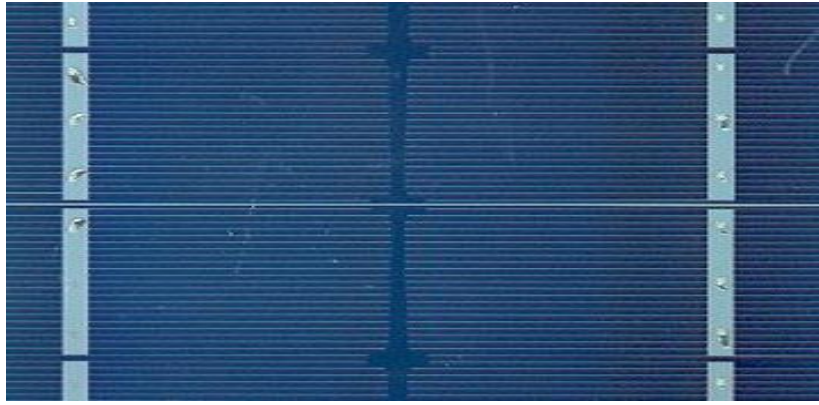


Figure I.7 : Cellules monocristallines

1.5.5.2. La cellule photovoltaïque en silicium Poly cristallin

Il peut être facilement reconnu grâce à ses cristaux bleus, et la cellule photovoltaïque est constituée d'une tranche de silicium de forme carrée. Ce type de cellule photovoltaïque se trouve généralement dans les installations domestiques, agricoles ou industrielles. Comme le montre la figure I.8.

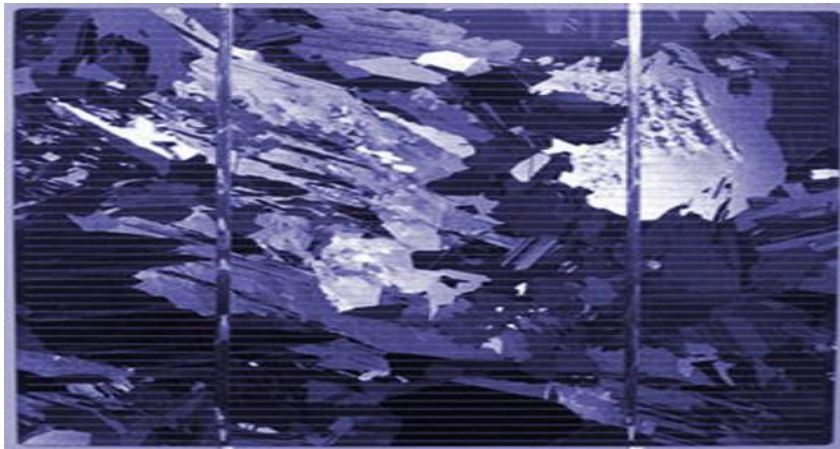


Figure I.8 : Cellules Poly cristallines

1.5.5.3. La cellule au silicium Amorphe

La cellule photovoltaïque amorphe est composée sur une fine couche de silicium. Ce type de cellule photovoltaïque est utilisé dans les luminaires publics et les calculateurs solaires.

Le silicium amorphe est obtenu au moyen de gaz de silicium, et ce gaz est évaporé sur la terre, le verre ou le métal de support, et la couleur de cette cellule photovoltaïque est gris foncé.

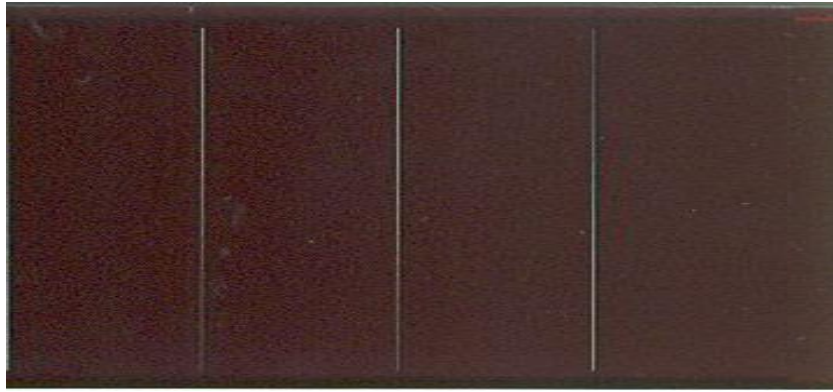


Figure I. 9 : Cellule Photovoltaïque amorphe

I.5.6. Les avantages et les inconvénients de chaque cellule [10]

I.5.6.1. La cellule photovoltaïque en silicium monocristallin

L'efficacité de cette cellule photovoltaïque atteint environ 25%, l'histoire de vie de ce type atteint 30 ans, et l'inconvénient de ce type est qu'il fournit un rendement très faible lorsque l'ensoleillement diminue.

I.5.6.2. La cellule photovoltaïque en silicium poly cristallin

La fabrication de ce type de cellule photovoltaïque est aussi simple que de connecter du silicium monocristallin, et sans que le coût de production soit moindre, et la production de ces panneaux fluctue entre 10 et 15 %.

I.5.7. Le générateur photovoltaïque [3]

Les besoins électriques de la plupart des appareils ménagers ou industriels sont souvent supérieurs à l'énergie électrique produite par les cellules solaires, et pour cette raison, plusieurs cellules sont connectées ensemble en série ou en dérivation pour créer une unité

I.5.7.1. Regroupement des cellules

Dans des conditions d'ensoleillement standard, un panneau solaire ne répond pas aux besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles, nous avons donc recours à la connexion d'un grand nombre de cellules primaires en série en parallèle.

1.5.7.1.1. Regroupement en série

On peut connecter les cellules (N_{pvs}) en série indique la figure (I.10), augmenter la tension du générateur photoélectrique, et après que le même courant traverse toutes les cellules, et concernant les tensions, toutes les tensions s'additionnent .L'équation résume les caractéristiques électriques de la interconnexion d'une série de cellules (N_{pvs})

$$V_{co\Omega_s} = N_{pvs} \times V_{co} \quad (I.1)$$

$$I_{cc\Omega_s} = I_{cc} \quad (I.2)$$

$V_{co\Omega_s}$: la Somme des tensions en circuit ouvert de N_{pvs} cellules en série

$I_{cc\Omega_s}$: courant de court-circuit de N_{pvs} cellules en série

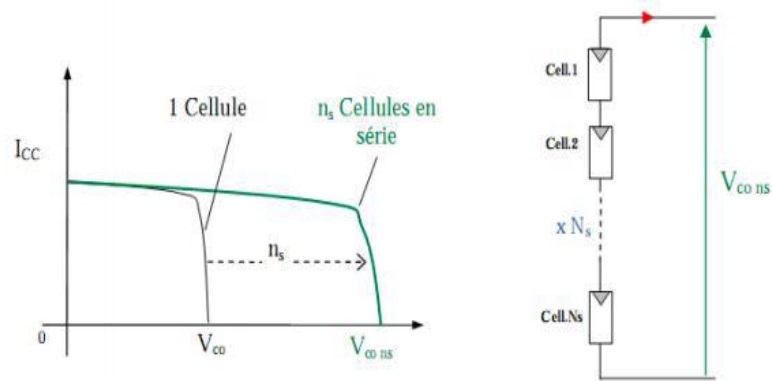


Figure I.10 : Caractéristique d'un groupement de n cellules identiques en série

1.5.7.1.2. Regroupement en parallèle

La connexion en parallèle des cellules (N_{pvp}), comme le montre la Figure (I.11), permet une augmentation du courant électrique produit par les cellules, et grâce à la connexion parallèle, les courants générés par les cellules sont collectés ensemble.

$$I_{cc\Omega_p} = I_{cc} \times N_{pvp} \quad (I.3)$$

$$V_{co} = V_{co\Omega_p} \quad (I.4)$$

$I_{cc\Omega_p}$: la Somme des courants de cout circuit de (N_{pvp}) cellule en parallèle.

V_{co} : tension du circuit ouvert de (N_{pvp}) cellules en parallèle.

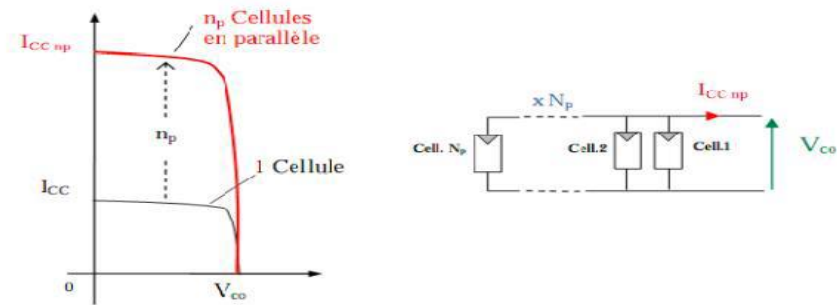


Figure I.11 : Caractéristique d'un groupement de n cellules identiques en parallèle

1.5.7.1.3. Regroupement (série et parallèle)

Ce type de liaison est souvent utilisé pour tirer des tensions plus élevées, car la liaison série des cellules solaires fournit une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à une seule cellule comme le montre la Figure (I.12).

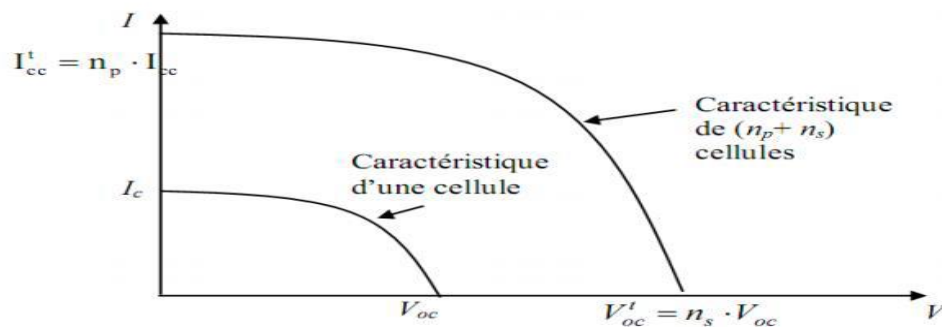


Figure I.12 : Caractéristique résultante d'un groupement hybride de cellules identiques

1.5.7.2. Fonctionnement électrique d'un générateur photovoltaïque

1.5.7.2.1. Courant de court-circuit I_{cc}

Le courant de court-circuit est le courant que la cellule démarre sous la lumière. Sortie de court-circuit, si les deux électrodes sont court-circuitées, les électrons expulsés par le champ interne de la jonction vont produire un courant de court-circuit I_{cc} correspondant à la photo. Le courant I_{ph} généré par le rayonnement, qui définit le nombre de paires électron-trou. Le G résultant traverse les nœuds sans se recombiner entre les longueurs de diffusion L_n et L_p , données par la relation

$$I_{ph} = q \times G \times (L_n + L_p) \quad (I.5)$$

Avec q : Charge de l'électron ($q = 1,602 \cdot 10^{-19} [C]$)

1.5.7.2.2. Tension de circuit-ouvert V_{co}

Si la cellule est en circuit ouvert, la tension mesurée aux bornes des électrodes est appelée tension en circuit ouvert V_{co} [9]. C'est la tension qui doit être appliquée à la diode dans le sens direct pour produire un courant égal à la photo courant, et elle est donnée par la relation :

$$V_{co} = (KT_q) \times [(I_{cc}I_0) + 1] \quad (I.6)$$

Avec :

K : Constante de Boltzmann ($k = 1,38.10^{-23} [Jk^{-1}]$), et T : Température de la cellule [K]

1.5.7.2.3. Puissance maximale P_{max}

Dans des conditions ambiantes fixes de fonctionnement (éclairage, température, taux de circulation d'air ambiant, etc.), la puissance électrique P disponible aux bornes de la cellule photovoltaïque est donnée par la relation :

$$P_{PV} = V \times I \quad (I.7)$$

P_{PV} : Puissance mesurée aux bornes de la cellule PV

V : Tension mesurée aux bornes de la cellule PV

I : Intensité mesurée aux bornes de la cellule PV

La puissance débitée par une cellule solaire est maximum quand le produit $V \times I$ est maximum.

Donc, L'équation (I.7) devient comme suit :

$$P_m = V_m \times I_m \quad (I.8)$$

On peut inscrire la puissance sous la courbe $I(V)$ Figure (1.13)

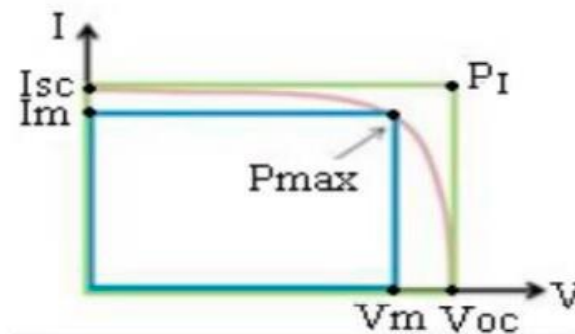


Figure I.13 : Puissance maximum d'une cellule PV

Et nous pouvons obtenir une cellule solaire parfaite, en multipliant la tension de circuit ouvert V_{oc} et le courant de court-circuit I_{sc}

$$P_I = V_{oc} \times I_{sc} \quad (I.9)$$

1.5.7.3. Facteur de forme

Et on va souvent travailler sur la caractéristique $I(V)$ pour qualifier la qualité d'une cellule PV ou d'un générateur, et ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale pouvant être produite par la cellule qui se réfère à P_{max} et la puissance qui est formée par le rectangle $I_{cc} * V_{oc}$. Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co}.I_{cc}} \quad (I.10)$$

1.5.7.4. Le rendement

Le rendement des cellules photovoltaïques est divisé par l'énergie maximale fournie par la cellule et l'intensité de la lumière incidente :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF.I_{cc}.V_{co}}{P_{in}} \quad (I.11)$$

1.6. Production de l'énergie électrique par des piles à combustible

1.6.1. Technologie des piles à combustible

La pile à combustible est une alternative écologiquement durable et économiquement viable vis aux combustibles fossiles, convertit l'énergie chimique en énergie électrique en utilisant de l'hydrogène et de l'oxygène. Et de la chaleur et de l'eau comme résultat. Des progrès significatifs ont été réalisés dans la recherche et le développement des générateurs de piles à combustible pour qu'ils soient plus efficaces [11].

1.6.2. Historique de développement des piles à combustible [11]

Découverte en 1839 par le physicien britannique William Robert Grove, la pile à combustible est un dispositif capable de convertir directement l'énergie chimique en énergie électrique en utilisant la réaction de combustibles oxydants, comme l'hydrogène avec l'oxygène. La pile à combustible offre de nombreux avantages, on cite notamment la grande efficacité énergétique, des

émissions de polluants réduites et une utilisation polyvalente dans divers domaines tels que la production d'électricité, les stations de transport comme le montre la Figure. I.14.

1839: First Fuel Cell (Grove's "Gas Battery")

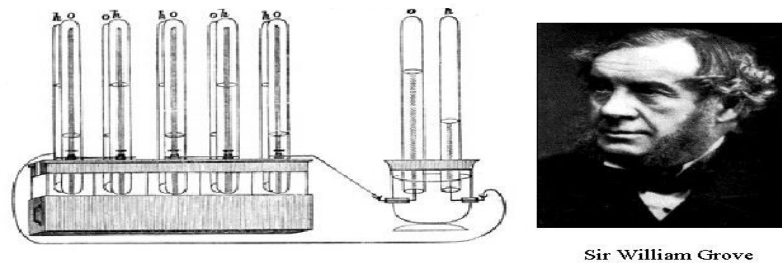


Figure1.14 : Expériences de William Grove «gas batteries»

Au cours des siècles, de nombreuses recherches ont été menées dans les domaines de la thermodynamique et de l'électrochimie. De nombreux progrès ont été réalisés, mais la technologie des piles à combustible est restée relativement inconnue jusqu'au développement des moteurs électriques et des batteries. En 1939, les premières évaluations des recherches dans ce domaine sont plutôt négatives, ce qui contribue à maintenir cette découverte dans les limbes pendant un certain temps.

Au cours des années 1970, on assiste à une nette amélioration des différents composants de la batterie : la membrane, les électrodes, l'électrolyte et les plaques de diffusion. Au début des années quatre-vingt, il s'agissait de batteries coûteuses, de courte durée de vie et économiquement et commercialement non viables. Après cette déception, le travail a commencé à décliner dans la plupart des pays.

I.6.3. Fonctionnement

Une pile à combustible est un réacteur électrochimique qui contient une seule énergie chimique d'un composé renouvelable, et le stock est une conversion spontanée en énergie électrique, chaleur et eau.

L'énergie chimique ne contient pas d'oxydation du carburant. L'élément chimique oxydant est l'oxygène présent dans l'azote. La nature du carburant change en fonction de l'utilisation. Il est peu utilisé que la forme moléculaire (H_2) et les hydrocarbures légers comme le méthane (CH_4) et le propane (C_3H_8) soient tous des fluides caloporteurs, car les carburants réactifs sont toujours

catalysés à la surface des électrodes. Ainsi, cela peut fonctionner tant que l'hydrogène est fourni avec précision à l'anode et l'oxydant à la cathode.

A l'intérieur de la pile à combustible, l'énergie chimique est apportée par le combustible plus le comburant, mais sans les mélanger, et le combustible et le comburant sont stockés à l'extérieur de la pile dans laquelle se produisent les réactions chimiques. Tant que le carburant élémentaire et le comburant sont disponibles, il est possible d'obtenir de l'énergie électrique comme l'essence et l'air pour les voitures [11].

I.6.4. Composants de la pile à combustible [11]

Les piles à combustible sont composées de plusieurs cellules primaires capables de générer la tension et le courant nécessaires pour produire de l'électricité. Elles fonctionnent en utilisant la réaction inverse de l'électrolyse de l'eau, ce qui leur permet de produire un courant électrique. Les cellules sont connectées à des composants auxiliaires, tels que des injecteurs de gaz combustibles, des systèmes de fourniture d'eau et des dispositifs de contrôle de la température et de la pression. Ces éléments auxiliaires assurent le bon fonctionnement du système de pile à combustible en régulant les flux de gaz, en fournissant les ressources nécessaires et en contrôlant les conditions de fonctionnement.

Une pile à combustible primaire est constituée de trois éléments principaux : une anode, une cathode et une couche d'électrolyte. Dans ce type de pile à combustible, l'électrolyte permet le passage sélectif des ions hydrogène chargés positivement (protons), tandis que les électrons circulent à travers un circuit externe, formant ainsi un courant électrique. La cathode agit comme catalyseur et facilite la réaction entre l'oxygène et les protons, ce qui génère de l'eau et de la chaleur comme sous-produits. En conséquence, la pile à combustible primaire convertit directement l'hydrogène et l'oxygène en électricité, offrant ainsi une source d'énergie propre et efficace. Ce processus est souvent utilisé dans des applications nécessitant une puissance continue, telles que les véhicules à hydrogène ou les systèmes de secours en cas de coupure de courant.

La Figure I.15 montre comment fonctionne de pile à combustible.

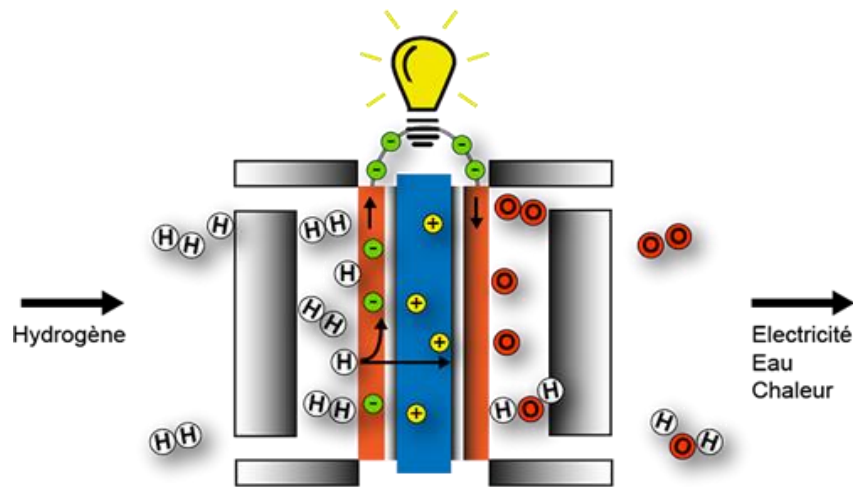
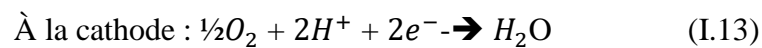
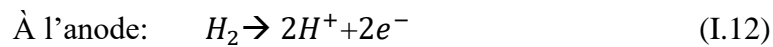


Figure I.15 : Principe de fonctionnement d'une pile à combustible

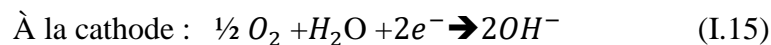
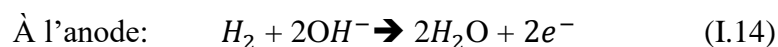
I.6.5. Les réactions [11]

Les réactions redox électrochimiques des cellules unitaires sont décrites par des réactions chimiques doubles. L'eau formée par l'oxydation de l'hydrogène est produite à l'anode dans le cas des électrolytes alcalins et à la cathode dans le cas des électrolytes acides. Par conséquent, dans les deux cas, les deux demi-réactions d'oxydation et de réduction sont les suivantes :

Pour une pile acide on a :



Pour une pile basique on a :



2OH est à l'anode, qui catalyse la réaction (platine) ; l'atome d'hydrogène réagit en libérant deux électrons, qui parcourent le circuit reliant l'anode à la cathode.

Le bilan donne :



I.6.6. Types de piles à combustible [3]

Il existe actuellement six types de piles à combustible, qui diffèrent en fonction de la nature de l'électrolyte, de la température de fonctionnement, de sa composition et de l'étendue de son utilisation pour chaque type.

Les différents types de piles sont présentés dans le **tableau I.1**.

Tableau I.1 : Différents types de piles à combustible [3]

Type de la PAC	AFC	DMFC	PEM	PAFC	MCFC
Electrolyte	Potasse (KOH) liquid	Membrane en polymère solide	Membrane en polymère solide	Acide phosphorique liquide	Sel de carbonate fondu liquide
Combustible possible	Hydrogène	Méthanol	Hydrogène	Hydrogène, gaz naturel (reformage)	Hydrogène, gaz naturel, méthanol
Température de fonctionnement	50 à 250°C	70 à 90°C	70 à 100°C	150 à 220°C	600 à 800°C
Gamme de puissance	1W à 100Kw	1W à plusieurs kW	1W à 10MW	200kW à 10MW	500kW à 10MW
Rendement électrique	55 – 60%	30 – 45%	30 – 45%	35 – 45% 75% en cogénération	50 – 60%
Domaine Applicatin	Spatial, Défense,	Transport, Equipements portable	Spatial, Transport, Stationnaire,	Stationnaire, Cogénération, Transport	Stationnaire, Cogénération

• **Les abréviations de Tableau I.1 :**

PAC : piles à combustible,

AFC: Pile à combustible alcaline,

DMFC: Pile à combustible directe au méthanol,

PAFC: Pile à combustible à acide phosphorique,

MCFC: Pile à combustible à carbonate fondu,

(KOH) : L'hydroxyde de potassium,

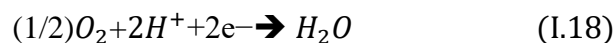
I.6.7. La pile à combustible à membrane électrolyte polymérique (PEMFC) [3]

Ce type de batterie a été conçu spécifiquement pour les missions spatiales Gemini de la NASA dans les années 1960, mais a été remplacé par des AFC, en raison du manque de performances en utilisant la technologie des piles à combustible pour plus d'applications. Les interactions suivantes se produisent:

A l'anode, on a:



Et à la cathode, on a :



Réaction globale :



L'électrolyte est une membrane polymère qui laisse passer les protons (H⁺). Des catalyseurs à base de platine sont utilisés pour les électrodes. Si le monoxyde de carbone n'est pas éliminé au cours du processus de purification, il peut être adsorbé sur ce catalyseur, ce qui réduit l'efficacité de la pile à combustible. De nombreux centres de recherche recherchent des catalyseurs plus puissants et moins chers, et des électrolytes polymères plus efficaces et moins chers pour l'échange d'ions.

Les plaques bipolaires peuvent être constituées de feuilles de graphite et de composites métalliques à base de carbone.

Dans la cellule unitaire, la tension nominale atteinte environ 0,7 V. Pour atteindre la tension requise pour l'utilisation, rassemblez un certain nombre de cellules connectées ensemble pour former ce que l'on appelle une "pile" résultant de la collecte de cellules unitaires.

Figure I.16 montre comment fonctionne la pile à combustible de type PEM(PEMFC).

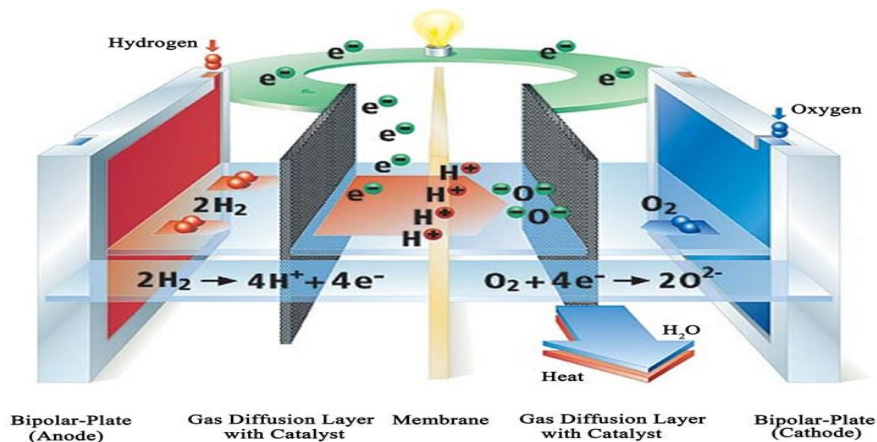


Figure I.16 : Schéma de principe d'une pile à combustible de type PEM(PEMFC)

I.6.8. Tension à vide [3]

L'énergie chimique libérée par une pile à combustible de type PEM peut être calculée par la variation de l'énergie libre de Gibbs (ΔG_f) qui représente la différence entre l'énergie ΔG_f des produits et ΔG_f des réactifs.

$$\Delta G_f = \Delta G_f \text{ des produits} - G_f \text{ des réactifs} = (G_f) H_2O - (G_f) H_2 - (G_f) O_2 \quad (I.20)$$

L'énergie libre de Gibbs est utilisée pour calculer l'énergie disponible dont elle assure le travail extérieur, elle dépend de la température, de la pression de l'hydrogène et d'oxygène selon la formule suivante :

$$\Delta G_f = \Delta G_f^0 - RT \ln\left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}}\right) \quad (I.21)$$

Avec :

ΔG_f : Énergie libre de Gibbs [KJ.mol⁻¹]

ΔG_f^0 : Énergie libre de Gibbs à la pression et température standards. À : 1 bar et 25 °C

$$\Delta G_f^0 = - 237,2 \text{ KJ.mol}^{-1}$$

R : constante universelle des gaz. R = 8,31451 J.Kg⁻¹. k⁻¹

T : température exprimée en Kelvin

P_{H_2} : Pression d'hydrogène [bar]

P_{O_2} : Pression d'oxygène [bar]

P_{H_2O} : Pression de la vapeur d'eau [bar]

Si toute l'énergie de Gibbs était convertie en énergie électrique, il n'y aurait aucune perte dans la PEMFC. Pour chaque mole d'hydrogène telle que, deux électrons traversent le circuit électrique externe et le travail électrique s'exprime par :

$$\Delta G_f = -2FE \quad (I.22)$$

Où F est Faraday (96485 coulombs), F est la charge électrique d'une mole d'électrons et E est la tension à vide ou en circuit ouvert de la PEMFC.

La tension en circuit ouvert d'une pile à combustible PEM s'écrit :

$$E = -\frac{\Delta G_f}{2F} = -\frac{\Delta G_f^0}{2F} + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}} \right) \quad (I.23)$$

Pendant le travail, la fonction PEMFC s'accompagne de quelques pertes une partie de l'énergie chimique est convertie en chaleur. $\frac{-\Delta G_f^0}{2F}$ Varie en fonction du point de fonctionnement. Il est égal à 1,229 V à l'état standard (25 °C et 1 bar)

I.6.9. Le Rendement [3]

Le rendement de conversion de l'énergie chimique en énergie électrique η_{fc} , est défini comme l'énergie électrique produite (E_{utile}) par rapport à la variation de ΔH_f de l'enthalpie totale (si l'énergie est récupérée).

$$\eta_{fc} = \frac{E_{utile}}{\Delta H_f} \quad (I.24)$$

Et les piles à combustible PEM, et nous pouvons utiliser le changement d'énergie libre de Gibbs comme énergie électrique utile après quoi le rendement est exprimé par :

$$\eta_{fc} = \frac{\Delta G_f}{\Delta H_f} \quad (I.25)$$

I.7. Le stockage d'énergie

I.7.1. Définition

La batterie est un ensemble de cellules électrochimiques capables de stocker de l'énergie électrique sous forme chimique, puis de la récupérer partiellement par la suite grâce à l'inversion des réactions. L'électrolyte se présente sous forme d'électrons dans le circuit relié à la batterie [12].

I.7.2. Différents types de batteries

I.7.2.1. Lithium-Ion (Li-ion)

Ces batteries fonctionnent à une capacité bien supérieure à celles des types NiCd et NiMH, permettant une miniaturisation importante à autonomie égale. Et le taux d'autodécharge est beaucoup plus faible [12].

Les batteries au lithium sont moins nocives pour l'environnement que les autres types. Cette technologie lithium-ion présente plusieurs avantages importants [12].

I.7.2.2. Nickel métal-hydrure (NiMH)

Par rapport à une batterie NiCd, ce type de batterie a une "densité d'énergie" plus importante, ce qui lui confère une plus grande autonomie. Comme les batteries NiCd, les batteries NiMH ne sont pas les mêmes. Ils ne sont chargés que lorsqu'ils sont complètement déchargés. Cependant, dans le cas d'une recharge précoce, la perte de capacité devient moins. Cette batterie est la plus polluée de ces batteries NiCd [12].

I.7.2.3. Nickel Cadmium (NiCd)

Ce type a une longue durée de vie dans le cadre d'un entretien approprié. Une batterie NiCd n'est rechargée qu'une seule fois après avoir été complètement déchargée, sinon sa capacité diminuera. Cette batterie est considérée comme fiable, en particulier en temps chaud et froid. Comme ce type offre une grande quantité d'énergie, cependant les batteries NiCd sont situées dans une zone d'autodécharge élevée, ce qui indique qu'ils perdent leur charge pendant le stockage [12].

Ce type est transporté avant le stockage en raison de la présence de cadmium pollué, et pour cette raison, il est éliminé de manière stricte.

Le tableau suivant représenté les paramètres des différents types des batteries (EB, Anode, Cathode, Électrolyte).

Tableau I.2 : Différents types des batteries [12]

Type de batteries	EB(V)	Anode	Cathode	Electrolyte
Acide-Plomb	2.1	PbO ₂	Pb	H ₂ SO ₄
Nickel-Cadmium	1.2	<i>Ni</i>	<i>Cd</i>	KOH
Aluminium-Air	1.5	Al	O ₂	KOH
Zinc-Air	1.65	Zn	O ₂	KOH
Sodium-Soufre	2.1	S	<i>Na</i>	<i>BAL₂O₃</i>
Sodium-Nickel	2.1-2.2	<i>NiCL</i>	<i>Na</i>	<i>BAL₂O₃</i>
Lithium-Ion	3.6	Intercalation de carbon	<i>LiCoO₂</i>	Organique

1.7.2.4. Exigences sur les Batteries Solaires [12]

La maintenance doit être présente sur les systèmes photovoltaïques autonomes pour maintenir la durée de vie de la batterie. Les batteries doivent répondre aux exigences suivantes :

- Un coût du kWh faible
- Une durée de vie longue
- Un rendement global élevé
- Une autodécharge très faible

La température est un facteur clé des performances de la batterie, notamment à basse température, et cela est dû au ralentissement des réactions chimiques. Ainsi, la capacité de la batterie diminue plus à basse température qu'à haute température. Ce critère doit être respecté dans zones à basse température telles que les montagnes.

1.7.3. Synthèse et caractéristiques [3]

Quelle que soit la technique utilisée, un accumulateur est défini par trois grandeurs :

- a) La densité d'énergie massique (ou volumique) en wattheures par kilogramme, Wh/kg (ou en wattheures par litre, Wh/l) correspond à l'accumulateur de stockage d'énergie par unité de masse (ou de volume).
- b) La densité de puissance massique en watts par kilogramme [W/kg] exprime la puissance (énergie électrique fournie par unité de temps) qui peut être fournie par une unité de masse d'une batterie.
- c) Le nombre de cycles "charge/décharge" caractérisant la durée de vie de la batterie.

Le tableau I.3 résume les performances techniques des batteries lithium-ion de tension 4 volts.

Tableau I.3 : Principales données techniques des accumulateurs au lithium-ion [3]

Température de fonctionnement	0 à 50 °C
Energie	80 à 120 Wh/kg 150 à 250 Wh/dm ³
Nombre de cycles profonds	200 à 1000
Puissance massique	50 à 200 W/kg
Rendement charge/décharge	→ Energétique : de 85 à 100 % → Faradique : de 90 à 100 %
Autodécharge	→ 10 % par mois
Impact environnemental	→ Solvants polymère et carbone inerte → Utilisation du cobalt → très toxique
Sécurité	→ Problème de stabilité mécanique → Echauffement et risques d'explosion en surcharge → Stockage longue durée : 30 à 50 % de l'état de charge

I.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fourni un aperçu de l'état actuel des systèmes de production d'énergie hybrides. Dans un premier temps, nous avons exploré les concepts fondamentaux liés aux systèmes hybrides. Ensuite, nous avons analysé différentes architectures de systèmes électriques multi-sources autonomes. Enfin, nous avons mené une étude descriptive sur les sources d'énergie

qui constituent ces systèmes, notamment les systèmes photovoltaïques, les piles à combustible et les batteries.

Ce chapitre sert d'introduction complète à notre travail, fournissant les informations de base essentielles nécessaires pour commencer à modéliser les composants du système de production d'énergie hybride. Dans les chapitres suivants, nous approfondirons les aspects de gestion de l'énergie de ce système hybride.

***Chapitre II : Dimensionnement et
Modélisation du Système Hybride :
Générateurs PV/ Piles à combustible /
Batteries***

II.1. Introduction

Au cours de ce chapitre, nous étudions les dimensions et l'intégration des composants du système hybride et indépendant. Nous divisons ce chapitre en deux parties :

Dans la première partie, nous calculons le nombre de panneaux photovoltaïques, de piles à combustible et des batteries nécessaires pour faire fonctionner la charge en plus les convertisseurs.

Au cours de la deuxième partie, nous étudions l'intégration des sources d'alimentation, ainsi que la quantité d'énergie générée par les panneaux photovoltaïques, les piles à combustible et les batteries.

II.2. Dimensionnement d'un Système hybride autonome

Au début, avant d'étudier le système hybride automatique, il est nécessaire de déterminer la quantité appropriée de composants afin d'assurer le plein fonctionnement des appareils pendant l'utilisation.

Cette étude comprend le nombre de piles à combustible et le nombre de panneaux photovoltaïques et de batteries.

II.2.1. Cahier des charges

Le tableau II.1 montre les charges et le temps de fonctionnement en plus de la consommation journalière.

Tableau II.1 : Cahier de charge de l'habitation considérée [12]

Charge	Nombre d'éléments	Puissance [W]	Durée d'utilisation [h]	Consommation journalière [Wh/j]
Lampes fluo	10	20	4	800
Réfrigérateur	2	70	10	1400
Congélateur	2	120	10	2400
Téléviseur	2	75	4	600
Machine à laver	2	300	1	600
PC	2	40	4	320
Total :				6120

Ces équipements nécessitent une puissance de **1410W** avec une consommation journalière de **6120Wh/j**.

II.2.2. Dimensionnement d'un Système hybride

Plusieurs critères doivent être pris en compte lors de la création et de la mise au point d'un système hybride autonome, et ils méritent une attention particulière en général [3]:

- Sources d'énergie primaires (Générateurs PV, piles à combustible)
- Support de stockage (batterie)
- Convertisseurs d'énergie (hacheurs)

La Figure II.1 montre la Configuration du système (Générateurs PV, pac, batterie)

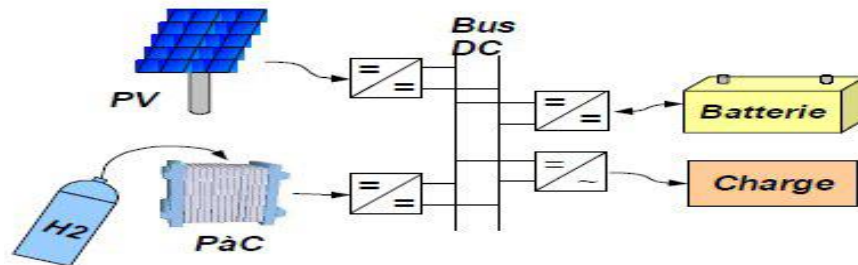


Figure II.1 : Configuration du système hybride autonome

Les performances et le coût d'un appareil électrique dépendent fondamentalement de sa taille et de la sévérité de son utilisation, car ces facteurs impactent directement son efficacité:

- ➔ Température de l'emplacement et conditions météorologiques
- ➔ Type et qualité des composants utilisés dans le système hybride
- ➔ Efficacité et fiabilité du système de commande et de commutation électrique.

II.2.2.1. Dimensionnement de la source photovoltaïque

Sur la base de la puissance électrique requise par la charge et de la quantité de rayonnement solaire quotidien, la puissance nominale générée par la source photovoltaïque est calculée par l'expression suivante [3] :

$$E_p = E_j / k \quad (II.1)$$

$$T_e = H_{\min} / 1000 \quad (\text{II.2})$$

$$P_c = E_p / T_e \quad (\text{II.3})$$

E_p : Energie journalière à produire [en Wh/j]

E_j : Besoins journaliers [en Wh/j]

T_e : Nombre d'heures d'éclairement équivalentes par jour [en h/j]

H_{\min} : Irradiation journalière [en kWh/m²/j]

P_c : Puissance crête des panneaux P_v [en Wc]

K : coefficient tenant compte des facteurs suivant :

→ L'incertitude météorologique.

→ La perte de rendement de la source dans le temps (vieillessement et poussières).

→ Les pertes dans les câbles et connexions.

La valeur approchée utilisée sera souvent de : $k = 0,65$ [13]

II.2.2.1.1. Détermination du nombre des panneaux PV en série/parallèle [3]

→ Calcul du nombre des panneaux PV nécessaires

$$N_{pv} = P_c / P_{c1} \quad (\text{II.4})$$

N_{pv} : Nombre des panneaux PV.

P_c : Puissance crête des panneaux PV [en Wc].

P_{c1} : Puissance crête d'un seul panneau [en Wc].

→ Calcul du nombre des panneaux PV en série

Afin de calculer la tension adaptée à une charge en utilisant plusieurs modules P_v en série, nous appliquons la loi suivante :

$$N_{PVS} = V_f / V_{PPm} \quad (\text{II.5})$$

N_{PVS} : Nombre des panneaux PV en série.

V_f : Tension de fonctionnement de l'installation [en V].

V_{PPm} : Tension des panneaux PV au point de puissance maximale [en V].

Tableau II.2 : Tension de fonctionnement recommandée

Puissance des panneaux PV	Tension de fonctionnement recommandée [Vf]
De 0 à 800 Wc	12V
De 800 à 1600 Wc	24V
Au-dessus de 1600 Wc	48V

➔ Calcul du nombre des panneaux PV en parallèle

La connexion en parallèle fournit à la charge la tension nécessaire.

Le nombre de panneaux est calculé par la formule suivante :

$$N_{PVP} = N_{PV} / N_{PVS} \quad (II.6)$$

N_{PV} : Nombre des panneaux PV

N_{PVS} : Nombre des panneaux PV en série

N_{PV} : Nombre des panneaux PV en parallèle

II.2.2.1.2. Calcul du nombre la surface totale des panneaux installées

Nous pouvons calculer la surface totale des panneaux installés sur la maison en utilisant la relation [3]:

$$S_{tot} = \frac{E_p}{\eta.G} \quad (II.7)$$

Avec :

S_{tot} : La surface totale des panneaux installés.

E_p : Energie journalière à produire [en Wh/j].

η : rendement du panneau PV.

G : rayonnement moyen quotidien [Wh/m²/j].

On peut calculer le nombre total de panneaux qui composent la source photovoltaïque par la relation suivante [3] :

$$N_{pv} = N_{tot} = \frac{S_{tot}}{S_{pv}} \quad (II.8)$$

Avec :

S_{tot} : La surface totale des panneaux installés.

S_{pv} : La surface d'un seul panneau.

N_{tot} : Nombre des panneaux PV.

II.2.2.1.3. Éclairement sur la ville d'Ouargla

→ Le rayonnement solaire journalière G dans la ville de Ouargla au mois de janvier est de **3648 Wh/m² /jour**, ce qui correspond à 3.648 heures d'éclairement par jour [13].

→ Donc, à travers l'équation (II.3), on obtient la valeur de la puissance de la source photoélectrique est : **$P_c = 2580.97 \text{ Wc}$** .

→ En tenant compte des caractéristiques du panneau PV AEG-40 utilisé et du premier tableau II.3 démontre de telles propriétés.

→ La surface totale de la source photovoltaïque obtenue à partir de l'équation (II.7) et le nombre total de panneaux photovoltaïques requis obtenus à partir de l'équation (II.8) pour le système photovoltaïque sont: **$S_{tot} = 25,80 \text{ m}^2$** et **$N_{tot} = 68$** panneaux solaires. Les caractéristiques de la source PV sont résumées dans le tableau II.4.

Tableau II.3 : Caractéristiques du panneau PV AEG-40 [13]

Puissance Maximale [W]	38.39
Tension de circuit ouvert [V]	22.40
Courant de court-circuit [A]	2.41
Tension optimale [V]	17.45
Courant optimal [A]	2.20
Rendement [%]	10
La surface d'un seul Panneau [m ²]	0.3839

Tableau II.4 : Caractéristiques de la source PV

Puissance de la source [Wc]	2580.97
Surface totale de la source [m ²]	25.80
Nombre des panneaux	68
Nombre des panneaux en séries	3
Nombre des panneaux en parallèle	23

II.2.2.2. Dimensionnement du stack de piles à combustible

Les piles à combustible servent de source d'énergie principale secondaire. Pour déterminer le dimensionnement approprié, le nombre de cellules PEM à connecter dans une configuration en série et en parallèle doit être évalué pour satisfaire les besoins en puissance de la résidence [12].

Un convertisseur DC/DC avec un rapport élévateur constant est utilisé pour connecter la pile à combustible au bus continu, qui fonctionne à une tension de $V_{dc} = 60$ V.

Afin d'obtenir le meilleur rendement du convertisseur concerné, la tension de la pile doit être la plus petite qui est égal à $30 = \frac{V_{dc}}{2}$ lorsque la tension limite de $V_{f_{cell}}$ est de **0,6 v** [12], le nombre des piles installées en série sont données par [3] :

$$N_{fcs} = \frac{v_{dc}}{2V_{f_{cell}}} = 50 \quad (II.9)$$

Lorsque la puissance de sortie requise est de 64 W, des piles à combustible sont utilisées. Dans le cas d'une pile de batteries d'une puissance de sortie de **600 W**, le nombre de batteries nécessaires dans une configuration parallèle est pris en compte est [3] :

$$N_{fcp} = \frac{P_{stack}}{P_{cell}} = 10 \quad (II.10)$$

II.2.2.3. Dimensionnement des batteries lithium-ion

Une batterie est caractérisée par sa tension, mesurée en volts, et sa capacité, mesurée en ampères-heures. L'énergie totale stockée dans la batterie est le produit de sa capacité et de sa tension. La détermination de la capacité de la batterie, notée C, repose sur plusieurs informations [12] :

- Besoins journaliers,
- La plage de température,
- Les exigences de durée de vie,
- Le taux de décharge souhaité,

La capacité nominale du pack de batteries est donnée par la relation suivante [3] :

$$C_n = (E_p * Aut) / (V_n * D) \quad (II.11)$$

Avec :

C_n : Capacité nominale des batteries [en Ah]

E_p : Energie journalière à produire [en Wh/j]

Aut : Nombre de jours d'autonomie

V_n : Tension nominale [en V]

D : Profondeur de décharge [en %]

Pour répondre aux besoins d'un jour :

- La tension nominale est **28,8V**
- La profondeur de décharge est de **90%**
- L'énergie stockée par jour est de **9415.38Wh**

Dans ce cas, la capacité nominale de batteries lithium-ion doit être d'environ **363.25Ah** pour Batterie élémentaire ayant une capacité et tension nominaux de **30Ah** et **3.6V**.

a) Nombre des batteries en série

$$N_{bas} = V_n / V_{n1} \quad (II.12)$$

b) Nombre des batteries en parallèle

$$N_{bap} = C_n / C_{n1} \quad (II.13)$$

c) Nombre total des batteries

$$N_{tot} = N_{bas} \times N_{bap} \quad (II.14)$$

N_{bap} : Nombre des batteries en série

N_{bap} : Nombre des batteries en parallèles

N_{tot} : Nombre total des batteries

V_n : Tension nominale des batteries [en V]

V_{n1} : Tension nominale d'une seule batterie [en V] C_n : Capacité nominale des batteries [en Ah]

C_{n1} : Capacité nominale d'une seule batterie [en Ah]

Pour obtenir une énergie journalière stockée de **9415.38 Wh**, nous disposerons de **104 Batteries**, **8** mises en série et **13** montées en parallèle.

II.2.2.4. Dimensionnement des convertisseurs continu/continu (hacheurs) [12]

Le processus de dimensionnement des convertisseurs DC/DC consiste à déterminer les valeurs appropriées pour l'inductance de chaque convertisseur (L_{fc}, L_{pv} et L_{BA}) ainsi que la capacité continue de la sortie (bus C_{dc}).

II.2.2.4.1. Convertisseur DC-DC lié aux panneaux PV

Un convertisseur Boost, également appelé hacheur parallèle, est un circuit électrique utilisé dans l'électronique de puissance pour convertir une tension continue inférieure en une tension continue supérieure et la Figure II.2 montre le schéma du Convertisseur DC-DC lié aux panneaux PV.

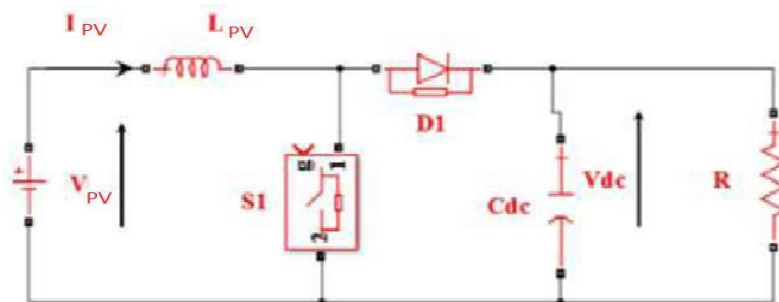


Figure II.2 : Convertisseur Boost lié aux panneaux PV

L'inductance de filtrage d'un convertisseur Boost connecté à une source PV est la suivante :

$$L_{pv} = \frac{V_{dc}}{4f\Delta I_{pvmax}} \quad (II.15)$$

II.2.2.4.2. Convertisseur DC-DC lié aux piles

Le convertisseur connecté à piles à combustible est un convertisseur appelé "Boost" Aussi "survolteur". Et la Figure II.3 montre le schéma du Convertisseur DC-DC lié aux piles.

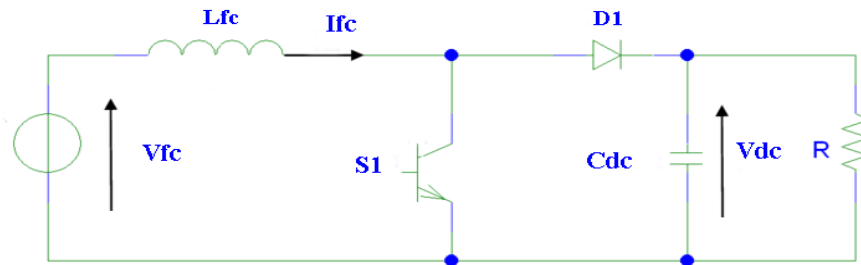


Figure II.3 : Convertisseur Boost lié au stack de PEM

Et l'expression de l'inductance de filtrage du Convertisseur Boost connecté à la pile PEM est calculée par la relation suivante :

$$L_{fc} = \frac{V_{dc}}{4F\Delta I_{fcmax}} \quad (II.16)$$

II.2.2.4.3. Convertisseur DC-DC lié aux batteries

L'adaptateur connecté au module de batterie fonctionne en deux modes L'adaptateur connecté au module de batterie possède deux modes de fonctionnement Le premier mode est le Mode "Boost", qui est utilisé lorsque les batteries sont complètement chargées Le deuxième mode est le mode "Buck", qui est utilisé lorsque les batteries absorbent de l'énergie et la Figure II.4 montre le schéma du Convertisseur DC-DC lié aux lié au stack de batteries lithium-ion.

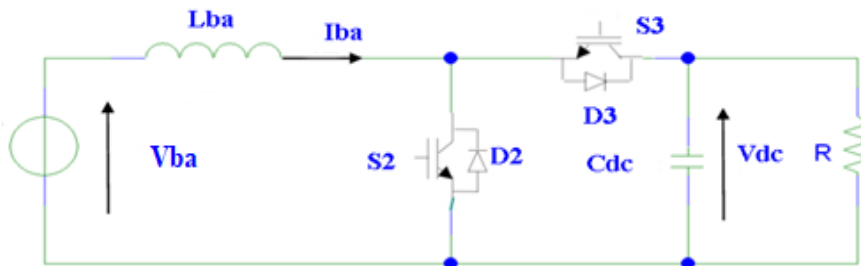


Figure II.4 : Montage Buck/Boost du convertisseur DC-DC lié au stack de batteries lithium-ion

Nous pouvons calculer l'expression de l'inductance de filtrage d'un Convertisseur Buck/Boost avec la relation suivante :

$$L_{ba} = \frac{V_{dc}}{4f\Delta I_{ba_{max}}} \quad (\text{II.17})$$

Nous pouvons calculer l'expression de capacité de filtrage d'un Convertisseur Buck/Boost avec la relation suivante :

$$C_{dc} = \frac{I_{max}}{4f\Delta V_{dc_{max}}} \quad (\text{II.18})$$

Avec $V_{dc} = 60\text{V}$, $f = 2000\text{Hz}$, $\Delta I_{max} = 2\%$, I_{max} et $\Delta V_{dc} = 5\% V_{dc}$

Les résultats des calculs dès l'inductance et de capacité sont présentés comme suit : $L_{fc} = 0.028 \text{ H}$
 $L_{pv} = 0.0074 \text{ H}$ et $L_{ba} = 0.01 \text{ H}$ et $C_{dc} = 0.0015 \text{ F}$.

Avec :

V_{dc} : Tension moyenne du bus capacitif [V].

f : Fréquence de découpage des convertisseurs [Hz].

ΔI_{max} : Ondulation maximale du courant dans l'inductance [A].

I_{max} : Courant dans l'inductance [A].

ΔV_{dc} : Ondulation de la tension aux bornes du condensateur de sortie [V].

II.3. Modélisation du système hybride autonome

La création d'un modèle d'un système simplifie le travail en permettant une meilleure compréhension de son fonctionnement, ainsi qu'en aidant à hiérarchiser le comportement de ses composants lors de l'utilisation. Dans notre cas particulier, les différents éléments du système hybride ont été modélisés séparément et devaient être intégrés afin de recréer l'ensemble du système [13].

II.3.1. Modélisation de l'éclairement

→ La courbe montre la valeur du rayonnement lumineux à différents moments de la journée en janvier [3].

→ Les valeurs d'éclairement quotidiennes utilisées ont été mesurées périodiquement et par temps clair [3].

Le tableau montre la valeur du rayonnement solaire tout au long de la journée pendant le mois de janvier.

Tableau II.5 : Valeurs du rayonnement solaire journalier dans le mois de janvier [12]

Heures TSV	7:00	8:00	9 :00	10 :00	11 :00	12 :00	13 :00	14 :00	15 :00	16 :00	17 :00
Rayonnement solaire Wh/m ²	0	145	327	476	573	606	573	476	327	145	0

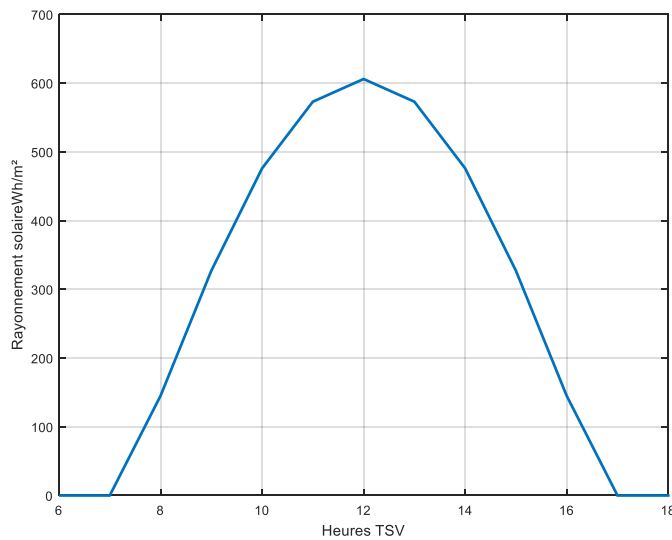


Figure II.5 : Rayonnement journalier à différents moments de la journée dans le mois de janvier

II.3.2. Modélisation de la source PV

Nous modélisons la phot cellule avec le circuit équivalent de la Fig. II.6 :

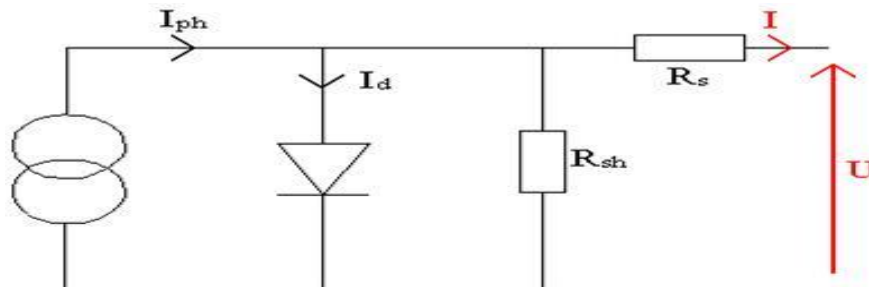


Figure II.6 : Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque

Nous avons [3] :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (II.19)$$

$$I_{ph} = [I_{cc} + K (T_{op} - T_{ref})] \frac{G}{G_0} \quad (II.20)$$

Et :

$$I_d = I_{0d} \left(e^{\frac{q(U+R_{sl})}{KT}} - 1 \right) \quad (II.21)$$

$$I_{sh} = \frac{U+R_{sl}}{R_{hs}} \quad (II.22)$$

$$I = I_{ph} - I_{0d} \left(e^{\frac{q(U+R_{sl})}{KT}} - 1 \right) - \frac{U+R_{sl}}{R_{hs}} \quad (II.23)$$

Avec :

I_{0d} : Courant de saturation de la diode [A] et I_{ph} : Photo courant ou courant généré par la cellule [A]

R_s : Résistance série [Ω] et R_{sh} : Résistance shunt [Ω] et n : Facteur d'idéalité

U : Tension thermique et K : Constante de Boltzmann ($k = 1,38.10^{-23} [Jk^{-1}]$)

q : Charge de l'électron ($q = 1,602.10^{-19} [C]$) et T : Température de la cellule [K]

Quant à la cellule photovoltaïque, qui fait partie d'un panneau photovoltaïque, elle est obtenue en connectant plusieurs cellules en parallèle et en série.

L'expression du courant passé par le module et sa tension aux bornes est donnée par les équations suivantes [3] :

$$I_{CCmod} = N_{pcel} \times I_{CCcel} \quad (II.24)$$

$$I_{PPMmod} = N_{pcel} \times I_{PPMcel} \quad (II.25)$$

$$V_{C0mod} = N_{SCel} \times V_{C0cel} \quad (II.26)$$

$$I_{CCmod} = N_{SCel} \times I_{PPMcel} \quad (II.27)$$

$$V_{PPmod} = N_{SCel} \times V_{PPMeL} \quad (II.28)$$

Avec :

I_{CCmod} : Courant de court-circuit du module [A]

I_{PPMmod} : Courant au point de puissance maximale du module [A]

V_{C0mod} : Tension en circuit ouvert du module [V]

V_{PPmod} : Tension au point de puissance maximale du module [V]

N_{SCel} : Nombre de cellules connectées en série

N_{pcel} : Nombre de cellules connectées en parallèle

La Figure II.7 et II.8 est montrée la Caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$ et $I_{pv} = f(V_{pv})$ dans les conditions (irradiation de 1000 W/m^2 , température 25° C , AM 1,5).

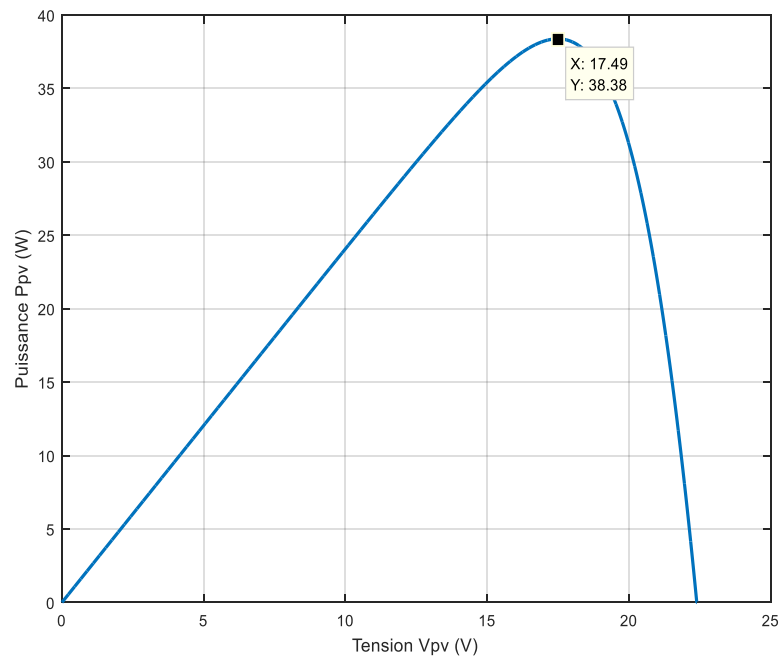


Figure II.7 : Caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$ du module PV AEG-40 dans les conditions standard

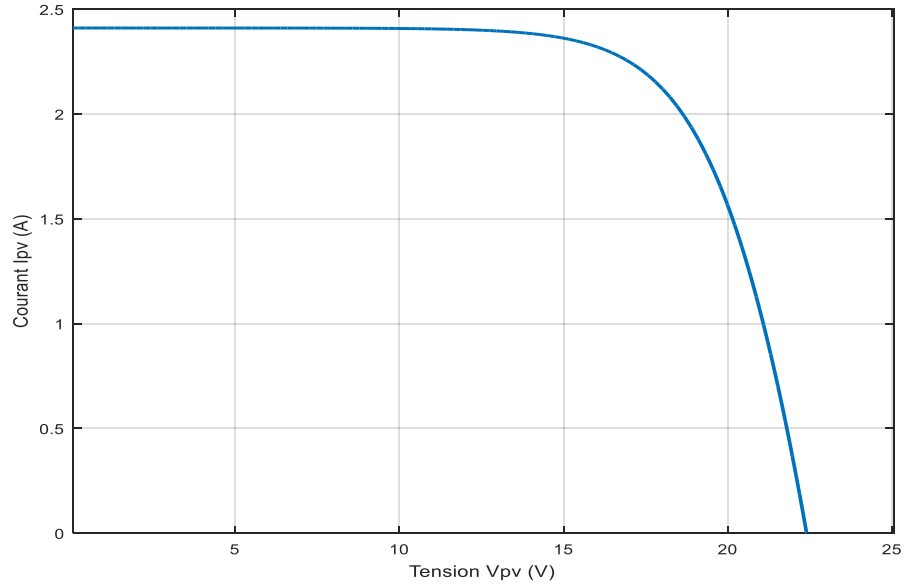


Figure II.8 : Caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$ du module AEG-40 dans les conditions standard

Les performances de notre module photovoltaïque focus sont affectées par la lumière incidente et la température. Les figures II.9, II.10, II.11 et II.12 montrent l'effet du rayonnement solaire et des changements de température sur la puissance du module PV.

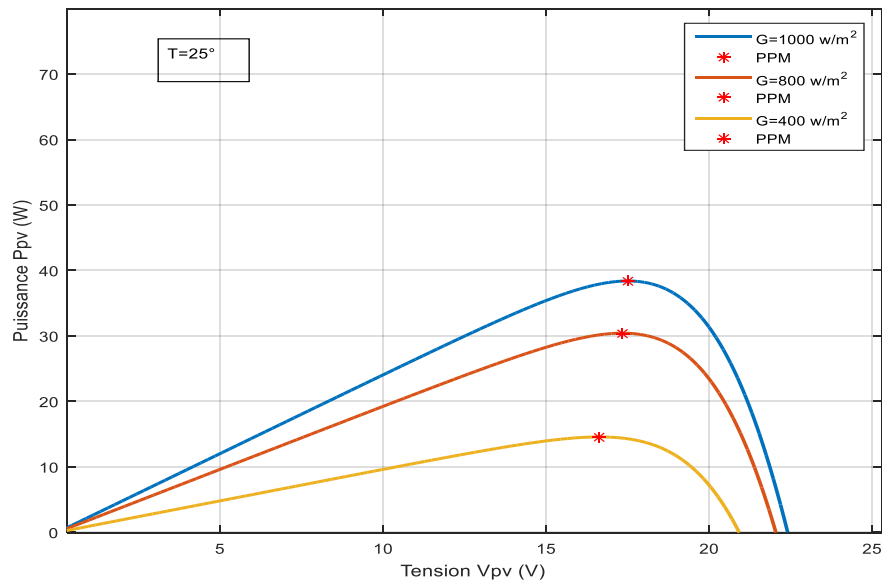


Figure II.9 : Influence de l'éclairement sur les caractéristiques $P_{pv} = f(V_{pv})$ du module PVAEG-40

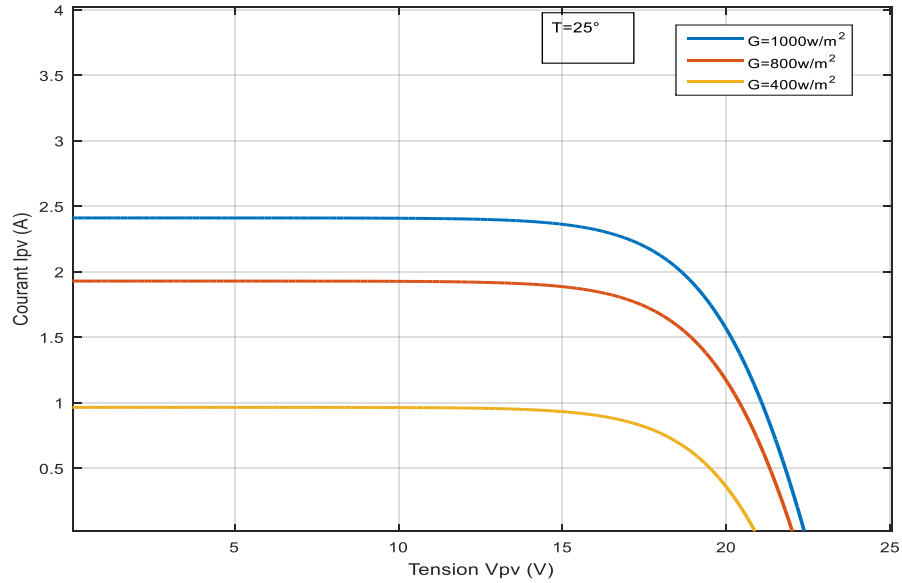


Figure II.10 : Influence de l'éclairement sur les caractéristiques $I_{pv} = f(V_{pv})$ du module PV AEG-40

La Figure II.11 et II.12 montre que le courant et la tension et la puissance du module sont proportionnels à l'éclairement.

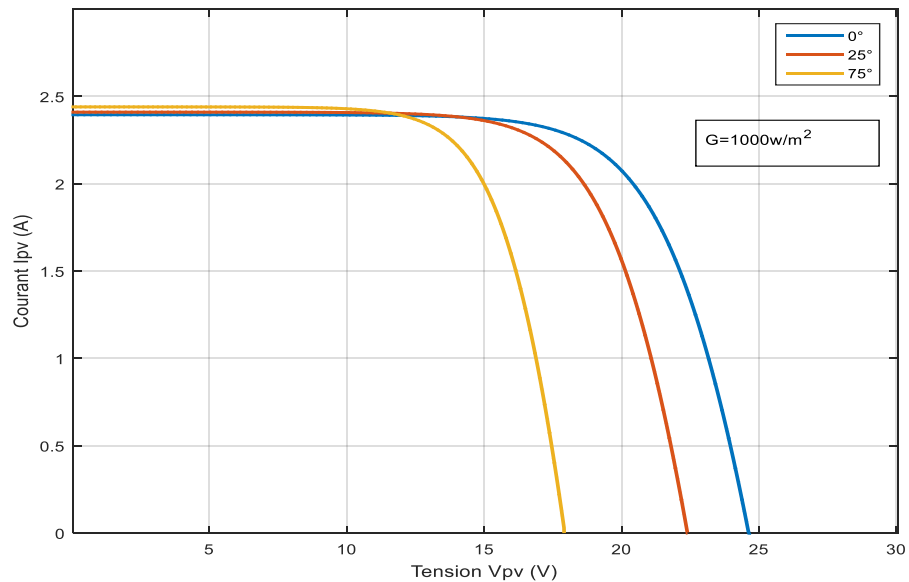


Figure II.11 : Influence de température ambiante sur la caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$ du module PV AEG-40

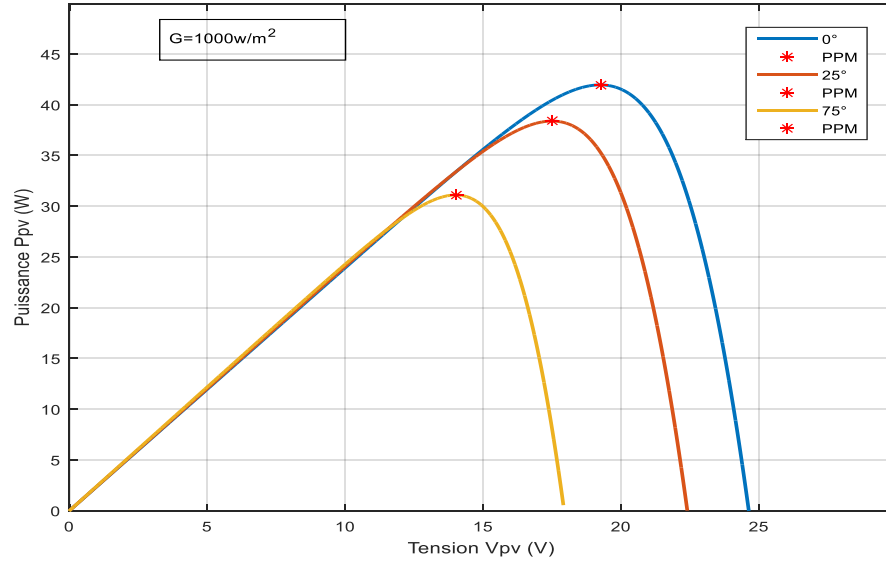


Figure II.12 : Influence de la température ambiante sur la caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$ du Module PV AEG-40

Une observation est que le courant fourni par le module photovoltaïque est directement lié à l'éclairement ambiant, ce qui signifie que plus l'éclairement est élevé, plus le courant est important. Le contraire de la tension, qui diminue avec l'augmentation du courant.

La figure II.13 montre la valeur du courant en termes de tension pour la source photovoltaïque.

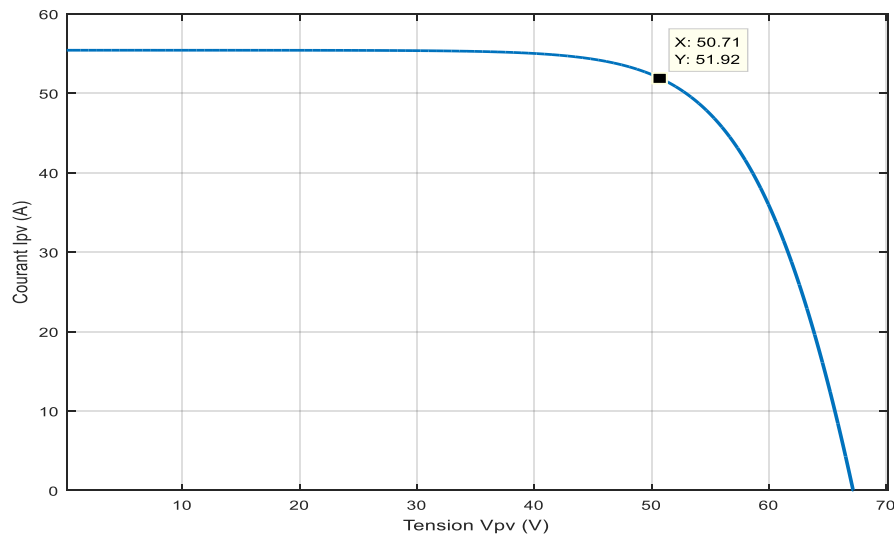


Figure II.13 : Caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$ de la source PV

La figure II.14 montre la valeur du Puissances en termes de tension pour la source photovoltaïque.

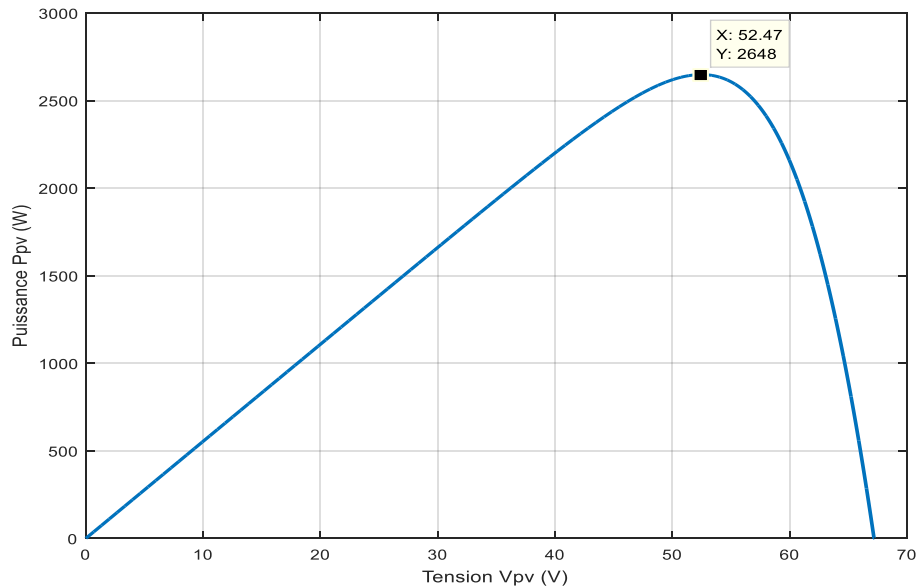


Figure II.14 : Caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$ de la source PV

II.3.3. Modélisation du comportement du stack de piles à combustible [13]

En raison de diverses pertes, la tension de la cellule PEM diminue par rapport à la tension théorique.

- a) Pertes ohmiques, origine de la polarisation ohmique,
- b) Pertes d'activation, cause de la polarisation d'activation,
- c) Pertes de concentration, source de la polarisation de concentration.

$$V_{\text{Cell}} = E - \Delta V_{\text{act}} - \Delta V_{\text{Conc}} - \Delta V_{\text{ohm}} \quad (\text{II.29})$$

Avec :

ΔV_{Conc} : Chute de tension due aux pertes de concentration [V]

ΔV_{ohm} : Chute de tension due aux pertes ohmiques [V]

ΔV_{act} : Chute de tension à cause de pertes d'activation [V]

II.3.3.1. Pertes ohmiques

Elles sont causées par la résistance des électrodes, des plaques bipolaires au flux d'électrons Et au passage des protons par l'électrolyte. On peut écrire la chute de tension correspondante par

L'équation suivante :

$$\Delta V_{ohm} = i_{cell}(R_{mem} + R_{éle}) = R_m(i_{cell} + i_n) \quad (II.30)$$

Avec :

ΔV_{ohm} : Chute de tension due aux pertes ohmiques [V]

R_{mem} : Résistance de la membrane [$k\Omega.cm^2$]

i_{cell} : Courant délivré par la cellule PEM [$mA.cm^{-2}$]

$R_{éle}$: Résistance interne des électrodes [$k\Omega.cm^2$]

R_m : Résistance totale de la pile à combustible [$k\Omega.cm^2$]

II.3.3.2. Pertes d'activation

La désactivation de la pile à combustible est causée par une réaction chimique qui commence à l'anode et à la cathode. Une partie de l'énergie disponible est utilisée pour briser et recombinaison les liaisons chimiques sur les électrodes. Si ces pertes se produisent aux deux électrodes, la réaction d'oxydation de l'hydrogène à l'anode est beaucoup plus rapide que la réaction de réduction de l'oxygène à la cathode. On peut voir que la désactivation est principalement causée par la réaction cathodique.

La relation entre la perte d'activation et la densité de courant est donnée par l'équation de Tafel :

$$\Delta V_{act} = A \ln\left(\frac{i_{celle} + i_n}{i_0}\right) \quad (II.31)$$

Avec :

ΔV_{act} : Chute de tension à cause de pertes d'activation [V]

A: Pente de la droite de Tafel qui est de l'ordre de 0.06V

I_{cell} : Courant délivré par la cellule PEM [$mA \cdot cm^{-2}$]

i_0 : Courant d'échange caractérisant à vide les échanges électrode électrolyte [$mA \cdot cm^{-2}$]

i_n : Courant interne permettant de tenir compte d'une éventuelle traversée de gaz et/ou d'électrons à travers l'électrolyte [$mA \cdot cm^{-2}$]

II.3.3.3. Pertes de concentration

La diminution de la concentration se produit en raison de la réduction de la pression partielle des gaz provoquée par la consommation de gaz, conduisant à un épuisement des mélanges gazeux. La pression dépend du courant fourni et des propriétés des circuits de gaz.

Cette chute de tension s'exprime :

$$\Delta V_{Conc} = -B \ln \left(1 - \frac{i_{cell} + i_{nil}}{I_1} \right) = -m e^{nicell} \quad (II.32)$$

Avec :

ΔV_{Conc} : Chute de tension due aux pertes de concentration [V]

i_{cell} : Courant délivré par la cellule PEM [mA/cm^2]

i_n : Courant interne permettant de tenir compte d'une éventuelle traversée de gaz et/ou d'électrons à travers l'électrolyte [mA/cm^2]

i_l : Courant limite

m : Constante de l'ordre de 3×10^{-5} [V]

Remarque : La chute de tension est exprimée en fonction du courant limite i_l , pour lequel toutes les piles à combustible utilisées sont mises à zéro, et la constante B est appelée constante de transport ou de transfert de masse.

II.3.3.4. Expression de la tension aux bornes d'une cellule à pile à combustible de type PEM en fonction du courant débité

$$V_{CELL} = E - \Delta V_{act} - \Delta V_{Conc} - \Delta V_{ohm} \quad (II.33)$$

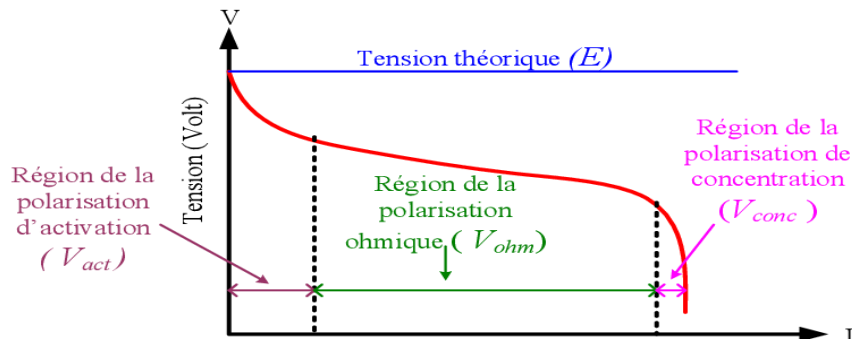


Figure II.15 : Caractéristique (densité de courant/tension) d'une pile PEM

II.3.3.5. Expression de la tension aux bornes du stack de piles à combustible PEM en fonction du courant débité

L'expression de la tension d'une cellule PEM peut être obtenue en additionnant toutes les chutes de tension qui résultent de différentes pertes. Cette approche est une méthode simple utilisée pour caractériser le fonctionnement des empilements de piles à combustible PEM, qui combine différents phénomènes en une seule équation. L'équation est exprimée sous la forme (II.33).

En regroupant toutes les chutes de tension causées par les différentes pertes, l'expression de tension d'une cellule PEM est exprimée par l'équation suivante

$$V_{CELL} = E - A \ln\left(\frac{i_{cell} + i_n}{i_0}\right) - B \ln\left(1 - \frac{i_{cell} + i_n}{l}\right) + R_m(i_{cell} + i_n) \quad (II.34)$$

Pour: $R_{cell} = 0.002\Omega$, $a = 21.273 A - 1$ et $b = 96.297$, Nous obtenons une expression de la tension aux bornes de la pile en fonction du courant de sortie comme suit :

$$V_{fc} = 50(E - R_{cell} I_{fc} - A \ln(a I_{fc} + b)) \quad (II.35)$$

II.3.4. Modélisation des batteries lithium-ion [12]

Il existe différents types de batteries lithium-ion disponibles, mais leur mise en œuvre peut être difficile en raison de plusieurs facteurs, tels que la température et la résistance interne. Pour les besoins de ce travail, nous avons sélectionné une batterie Li-ion qui est modélisée par un circuit RC série. Lorsque la batterie est en mode décharge, l'équation de la tension aux bornes peut s'exprimer comme suit :

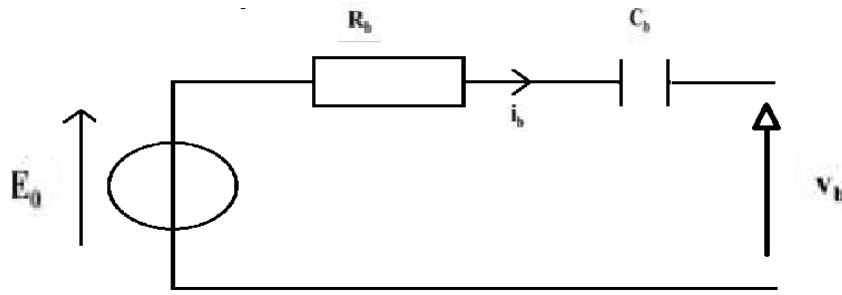


Figure II.16 : Modèle R-C série d'une batterie lithium-ion [12]

L'application de la loi des mailles au circuit de la figure II.16 donne :

$$V_b = E_0 - V_{cb} - R_b i_b = E_0 - R_b i_b - \frac{1}{C_b} \int i_b dt \quad (II.36)$$

Avec :

V_b : Tension de la batterie lithium ion [V] , E_{b0} : Sa tension à vide [V] , i_b : Son courant [A]

R_b : Sa résistance [Ω]

Pour un pack composé de N_{bs} batteries en série et N_{bp} en parallèle, nous pouvons écrire :

$$E_{b0} = N_{bs} * E_0 \quad (II.37)$$

$$R_{ba} = \left(\frac{N_{bs}}{N_{bp}} \right) * R_b \quad (II.38)$$

$$C_{0Bm} = \left(\frac{N_{bp}}{N_{bs}} \right) * C_b \quad (II.39)$$

Nous définissons l'état de charge, EDC_{ba} , du stack comme étant le rapport entre sa capacité nominale C_{ban} et la quantité de charge Q_{mba} manquante par rapport à :

$$EDC_{ba} = (1 - Q_{mba}/C_{ban}) \times 100\% \quad (II.40)$$

Avec :

EDC_{ba} : Etat de charge stack des batteries

C_{ban} : Capacité nominale

Q_{mba} : Quantité de charge

II.3.5. Modélisation du fonctionnement des convertisseurs statiques (hacheurs)

Une connexion ouverte pour la source d'alimentation, la source PV, la pac et la batterie nécessite trois cvs pour mettre en œuvre le bus cc. Un cvs de type Boost est utilisé pour les piles à combustible pour augmenter la tension de la batterie, qui est généralement inférieure à la tension du bus cc. La batterie est connectée via un convertisseur statique réversible en courant (cvs buck/boost) pour permettre la charge ou la décharge. La modélisation des convertisseurs comprend une analyse des différentes séquences de travail et suppose des états de commutation parfaits [12].

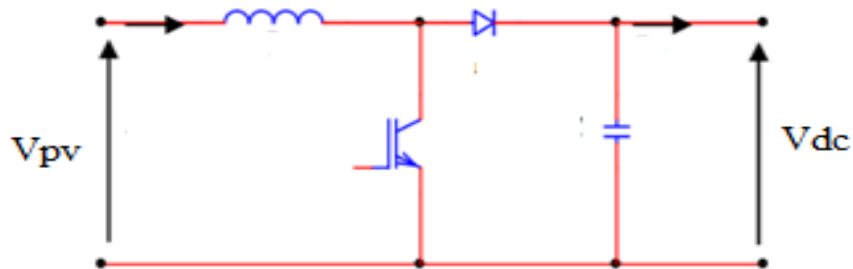


Figure II.17 : Montage Boost du convertisseur DC-DC connecté à la source PV

Les Figure II (18 et 19) présentent chacune un schéma de principe du convertisseur Boost de DC-DC connecté au pack et de pile de batteries.

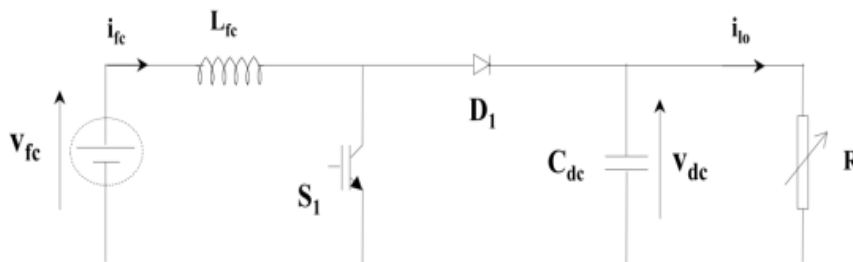


Figure II.18 : Montage Boost du convertisseur DC-DC connecté au stack de piles [12]

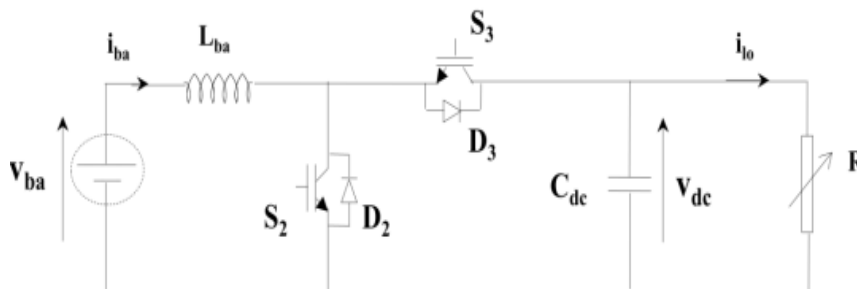


Figure II.19 : Montage Boost du convertisseur DC-DC connecté au stack de batteries [12]

Le tableau II.6 fournit des informations sur le type de convertisseur connecté à chaque source d'alimentation. Le convertisseur est un dispositif électrique qui permet de modifier la tension d'une source d'alimentation électrique.

Tableau II.6 : Types des convertisseurs DC-DC associés aux sources d'énergie [12]

Source d'énergie	Source PV	Piles à combustible PEM	Batterie lithium-ion
Convertisseur associé	<i>Boost</i>	<i>Boost</i>	<i>Boost/ Buck</i>

Convertisseur élévateur : Un convertisseur élévateur (boost) ou hacheur shunt est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de valeur supérieure.

Convertisseur Buck-Boost : Il s'agit d'une alimentation à découpage qui convertit la continuité de tension en une tension continue de valeur inférieure ou supérieure mais de polarité opposée. L'inconvénient de ce convertisseur est que son interrupteur n'a pas de borne relié au zéro, il est donc plus compliqué à contrôler.

A travers les types de convertisseur associé les équations sont décrites par le système d'équations suivantes [12] :

$$\frac{di_{PV}}{dt} = \frac{1}{L_{PV}} = (V_{PV} - (1 - U_2)V_{PV}) \quad (II. 41)$$

$$\frac{dif_c}{dt} = \frac{1}{L_{fc}} = (V_{fc} - (1 - U_2)V_{dc}) \quad (II. 42)$$

$$\frac{dib_c}{dt} = \frac{1}{L_{ba}} = (V_{ba} - U_3V_{dc}) \quad (II. 42)$$

II.4. Conclusion

Ce chapitre de mémoire est divisé en deux parties, une section pour les dimensions et une section pour la modélisation.

Au cours de la première partie de ce chapitre, nous avons examiné le dimensionnement des sources d'alimentation de notre système hybride (Générateur PV, pile à combustible, batterie lithium-ion) plus le convertisseur de courant continu.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons abordé la modélisation des sources d'alimentation de notre système hybride, ainsi que des transformateurs de courant continu connectés au bus de courant continu.

La modélisation des sources d'alimentation est importante pour comprendre leur comportement électrique et évaluer leur performance dans différentes conditions de fonctionnement.

***Chapitre III : Gestion d'Énergie du
Système Hybride : Générateurs PV/Piles
à Combustible / Batteries***

III.1. Introduction

Dans ce dernier chapitre, nous gérons l'alimentation électrique d'un système hybride, composé de trois sources d'énergie : l'alimentation photovoltaïque, les piles à combustible et les batteries pour la charge.

Cependant, l'objectif souhaité tout au long de ce chapitre est de savoir comment créer une stratégie capable de réguler et de produire de l'énergie entre les trois sources d'alimentation de notre système, assurant la continuité de l'alimentation de la charge électrique.

Nous ferons ce processus en utilisant le programme de simulation "MATLAB".

III.2. Stratégies de gestion du système hybride d'énergie [3]

Le système d'alimentation hybride est basé sur les informations suivantes :

- Profil de charge : variation diurne, pics et creux, etc.
- Caractéristiques des sources d'énergie : variation diurne,
- Configuration du système : nombre et type de composants.

III.3. Architecture du système hybride (Pv, Pac et Batteries) [14]

La formation de SEH est illustrée à la Figure III.1. Permettre :

Une source photovoltaïque : il s'agit d'un ensemble de panneaux solaires qui convertissent l'énergie solaire en électricité. La tension de cette source est notée V_{pv} et sa puissance P_{pv} .

Un stack de piles à combustible : il s'agit d'un ensemble de cellules électrochimiques qui convertissent l'hydrogène et l'oxygène en eau et en électricité. La tension de cette source est notée V_{fc} et sa puissance P_{fc} .

Un convertisseur de type Boost pour la source photovoltaïque : il s'agit d'un dispositif électronique qui élève la tension de la source photovoltaïque pour la rendre compatible avec le bus continu du système hybride.

Un convertisseur de type Boost pour le stack de piles à combustible : il s'agit d'un dispositif électronique similaire au convertisseur de la source photovoltaïque, mais qui élève la tension de la pile à combustible.

Des batteries lithium-ion en tant que source auxiliaire d'énergie : ces batteries sont utilisées pour stocker de l'énergie lorsque les sources principales ne sont pas suffisantes. Elles sont reliées au bus continu du système hybride par un convertisseur bidirectionnel en courant de type Buck/Boost.

Un **convertisseur** bidirectionnel en courant de type Buck/Boost pour les batteries : ce convertisseur électronique permet de réguler la tension et la puissance des batteries lors de la charge ou de la décharge, tout en les connectant au bus continu du système hybride.

Le **bus continu** est une composante clé dans le système hybride d'énergie car il permet de connecter toutes les sources d'énergie et d'assurer une alimentation continue et fiable aux charges électriques.

Dans la figure III.1, nous pouvons voir un schéma de connexion des alimentations à la charge via des convertisseurs cc/cc (convertisseurs de courant continu à courant continu) et des convertisseurs cc/ac (convertisseurs de courant continu à courant alternatif).

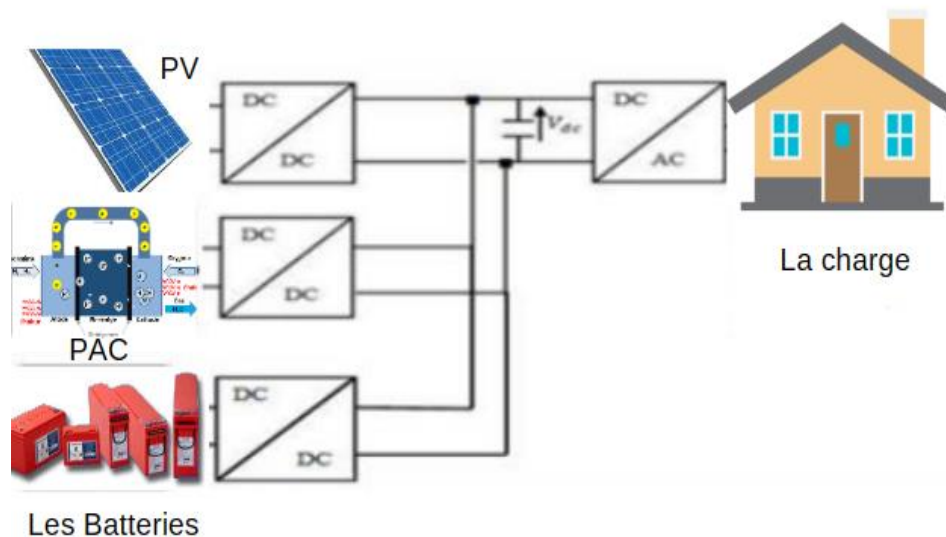


Figure III.1 : Schéma du raccordement des sources et consommateurs énergétiques

Afin d'assurer la disponibilité continue d'énergie continue pour la maison, il est nécessaire de vérifier le défaut

$$P_{pem} = P_{pv} + P_{fc} + P_b \quad (III.1)$$

III.3.1. Structure du système hybride autonome

La figure III.2 montre structure du notre système composé d'alimentations, de convertisseur, d'un bus et la charge.

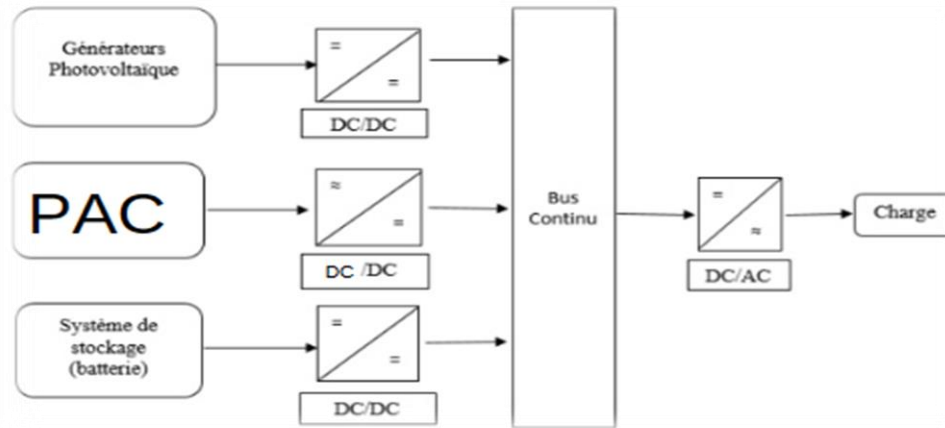


Figure III.2 : Structure du système hybride autonome étudié

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

Lorsqu'il y a une demande de puissance de la part de la charge, le système hybride donne la priorité à l'alimentation de la charge, ce qui signifie que pendant ces périodes, le système ne sera pas en mesure de charger les batteries car toute la puissance disponible est utilisée pour alimenter la charge. Lorsque les besoins de la charge sont satisfaits, la batterie est chargée.

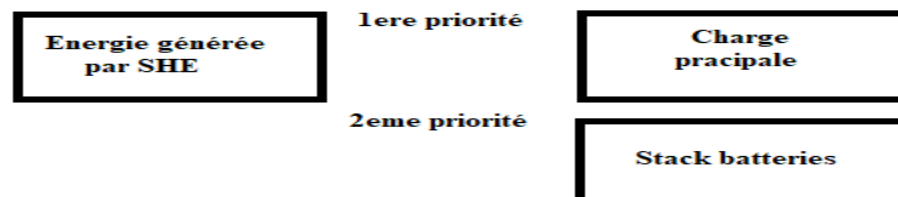


Figure III.3 : Diagramme de priorité d'alimentation

III.5. Principe de la gestion de l'énergie [3]

La gestion de l'énergie a pour objectif d'assurer la continuité de la puissance requise par la charge tout en prenant en compte diverses contraintes de fonctionnement telles que la puissance limite de la source PV et PAC ainsi que l'état de charge des batteries.

Les principes de la gestion d'énergie sont illustrés dans la figure III.4.

L'objectif principal de la gestion d'énergie est de pouvoir répondre à la demande de la charge de pointe en tout temps, même dans des conditions météorologiques défavorables où les sources d'énergie fournissent moins d'énergie.

Pour atteindre cet objectif, il est important de trouver la meilleure répartition de puissance entre les sources d'alimentation des puissances et les sources d'énergie du système.

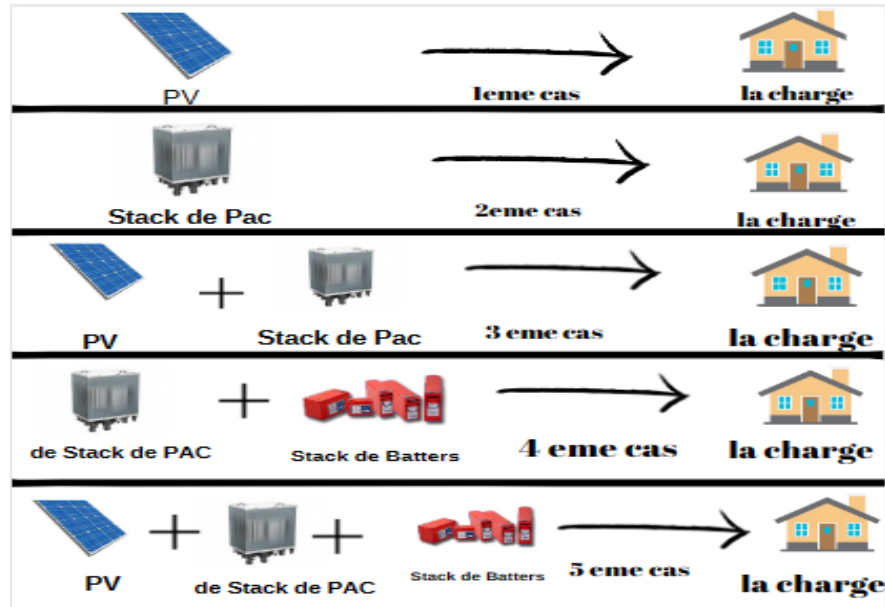


Figure III.4 : Sens des flux énergétique

Le Système hybride est conçu pour fonctionner dans cinq cas différents.

Dans le premier cas, l'habitat est alimenté uniquement par la source photovoltaïque si : $P_{ch} \leq P_{pv}$.

Dans le deuxième cas, l'habitat est alimenté uniquement par le stack de piles à combustible si : $P_{pv} = 0$ et $P_{ch} \leq P_{fcmax}$.

Dans le troisième cas, l'habitat est alimenté conjointement par la source photovoltaïque et le stack de piles à combustible si : $P_{ch} > P_{pv}$ et $P_{ch} \leq (P_{pv} + P_{fcmax})$.

Dans le quatrième cas, l'habitat est alimenté conjointement par le stack de piles à combustible et les batteries si : $P_{pv} = 0$ et $P_{ch} > P_{fcmax}$.

Dans le cinquième cas, l'habitat est alimenté conjointement par la source photovoltaïque, le stack de piles à combustible et les batteries si : $P_{ch} > P_{pv}$ et $P_{ch} > (P_{pv} + P_{fcmax})$.

Dans le **tableau III.1**, les paramètres clés du système hybride automne sont résumés pour offrir une vue d'ensemble des caractéristiques importantes du système.

Tableau III.1 : Paramètres du système hybride automne

Source photovoltaïque		
P_{PV-max}	<i>Puissance [Wc]</i>	2580.97
S_{PV-tot}	<i>Surface [m²]</i>	25.80
N_{PV}	<i>Nombre</i>	68
N_{PVs}	<i>Nombre des panneaux en série</i>	3
N_{PVp}	<i>Nombre des panneaux en parallèle</i>	23
V_{PV-co}	<i>Tension de circuit ouvert [V]</i>	22.40
I_{PV-cc}	<i>Courant de court-circuit [A]</i>	2.41
Piles à combustible		
V_{fcn}	<i>Tension nominale [V]</i>	46.3
P_{fc-max}	<i>Puissance maximale [W]</i>	600
Batteries lithium-ion		
V_{vban}	<i>Tension nominale [V]</i>	28.8
C_{ban}	<i>Capacité [Ah]</i>	363.25
C_{ba}	<i>Capacité [F]</i>	86.66
R_{ba}	<i>Résistance [Ω]</i>	0.0067
Bus continu		
V_{dc-ref}	<i>Tension de référence [V]</i>	60
C_{dc}	<i>Capacité [F]</i>	0.0015

Profil de consommation d'électricité qui est représenté sous forme schématique dans la Figure III.1 (En couleur jaune). Le graphique montre la production et la consommation d'énergie électrique au cours d'une heure, permettant aux lecteurs de comprendre facilement la répartition de l'énergie produite et consommée au cours de cette période.

III.6. Résultats de simulation

Les résultats du tableau obtenus à l'aide de l'outil "Matlab/Simulink" peuvent fournir des informations détaillées sur les performances de chute du système hybride.

Tableau III.2 : Voici les résultats obtenus avec l'outil "Matlab/Simulink"

Heures TSV	Rayonnement solaire (Wh/m ²)	Consommation quotidienne des appareils électriques	Puissance de la source PV	Puissance du stack de PEM	Puissance du stack de Batteries
1:00	0	0	0	0	0
2:00	0	217.2	0	217.2	0
3 :00	0	217.2	0	217.2	0
4:00	0	217.2	0	217.2	0
5:00	0	217.2	0	217.2	0
6:00	0	330	0	330	0
7:00	0	330	0	330	0
8:00	145	165.6	333.9	0	0
9:00	327	165.6	809.1	0	0
10:00	476	225.6	1211	0	0
11:00	573	225.6	1476	0	0
12:00	606	900	1566	0	0
13:00	573	900	1476	0	0
14:00	476	420	1211	0	0
15:00	327	586.5	809.1	0	0
16:00	145	586.5	333.9	252.6	0
17:00	0	471	0	471	0
18:00	0	471	0	471	0
19:00	0	1350	0	600	750
20:00	0	1350	0	600	750
21:00	0	300	0	600	-300
22:00	0	300	0	600	-300
23:00	0	0	0	450	-450
24:00	0	0	0	450	-450

III.7. Résultats de simulation et discussion

III.7.1. Puissances des sources d'énergie et la charge

La figure III.5 représente les Puissances des différentes sources de nutrition pour notre système hybride, et on note l'intégration de l'apport énergétique entre les sources de nutrition pour répondre aux besoins de la charge.

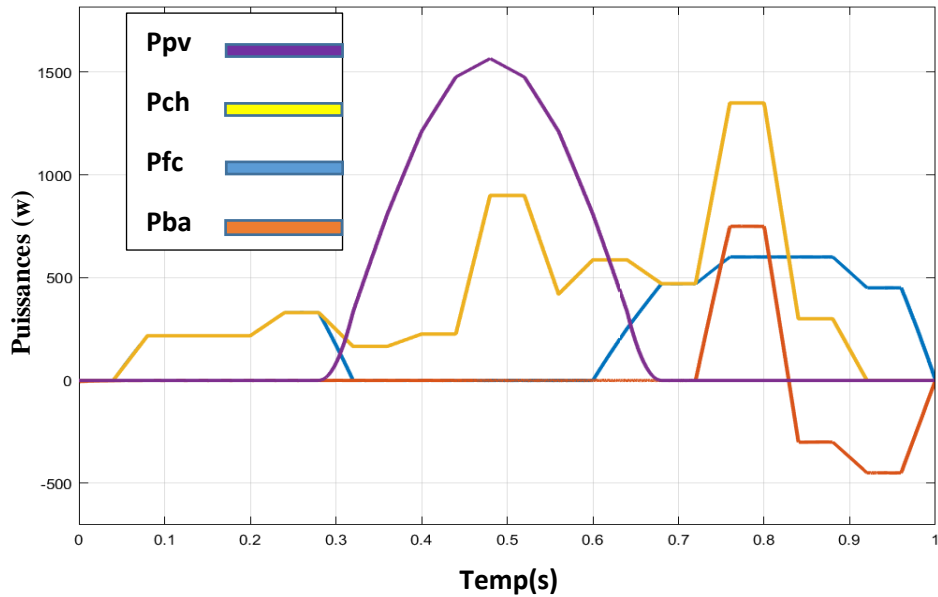


Figure III.5 : Puissances des sources d'énergie et la charge

III.7.2. Puissances du système

Les figures III.6, III.7 et III.8 représentent les puissances de chaque source alimentation (Pv, Pac, Battery) et sont tracées en fonction du temps avec leur référence.

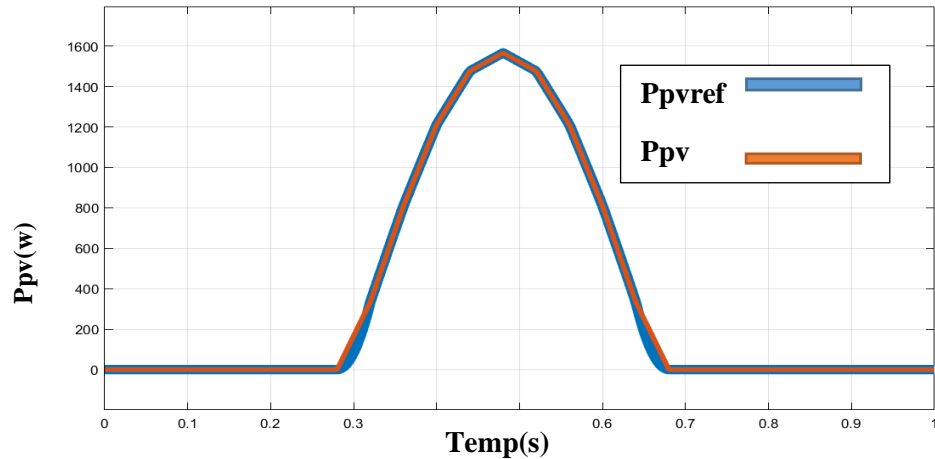


Figure III.6 : Puissance de la source PV et sa référence

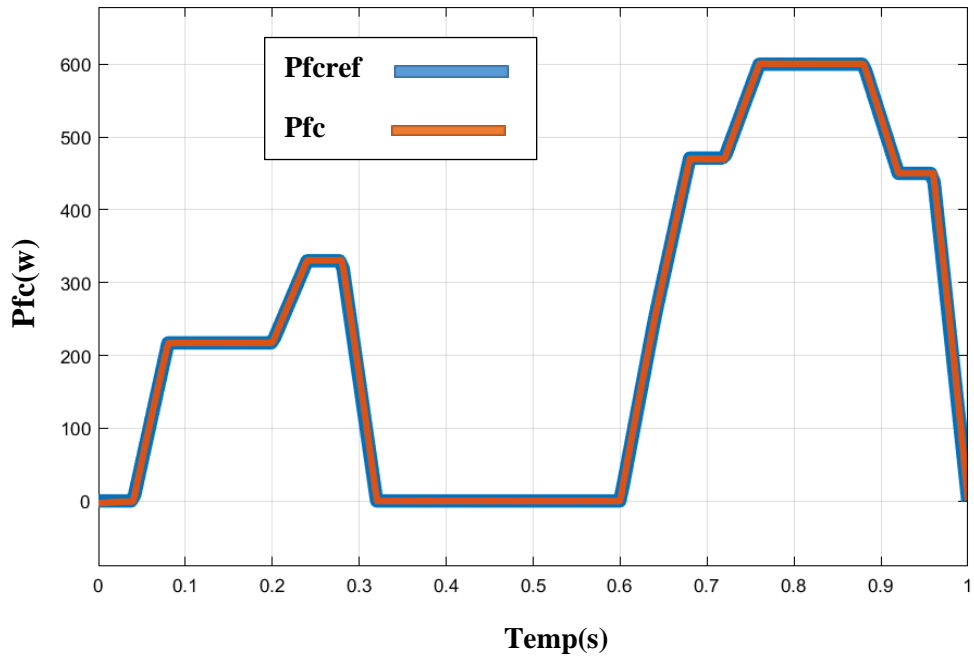


Figure III.7 : Puissance du stack de piles à combustible et sa référence

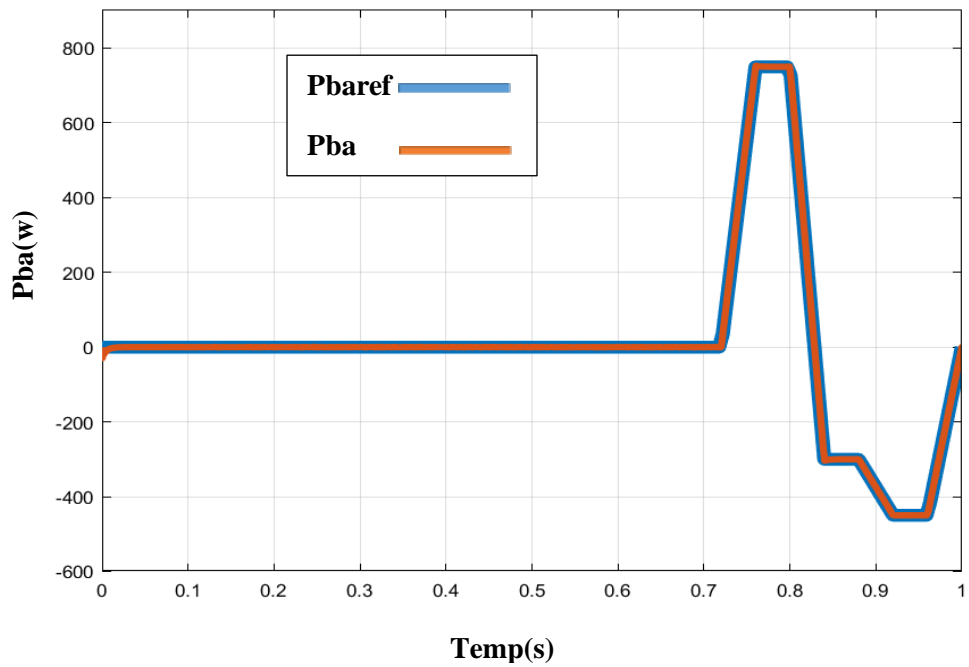


Figure III.8 : Puissance du stack de batteries en fonction de temps

III.7.3. Courants du système

Les figures III.9, III.10 et III.11 représentent les courants de chaque source alimentation (Pv, Pac, Battery) et sont tracées en fonction du temps avec leur référence.

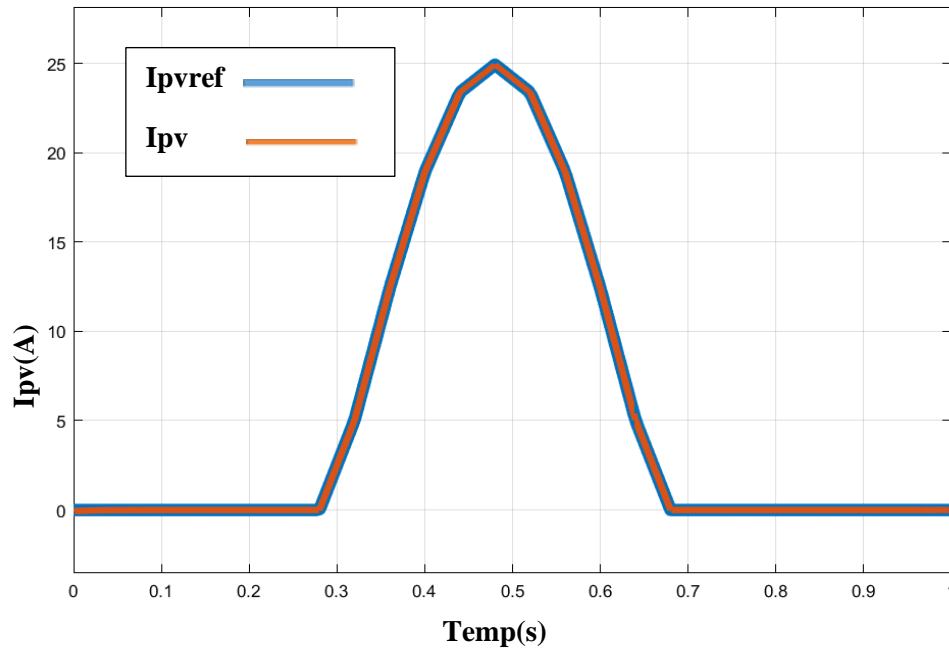


Figure III.9 : Courant de la source PV et sa référence

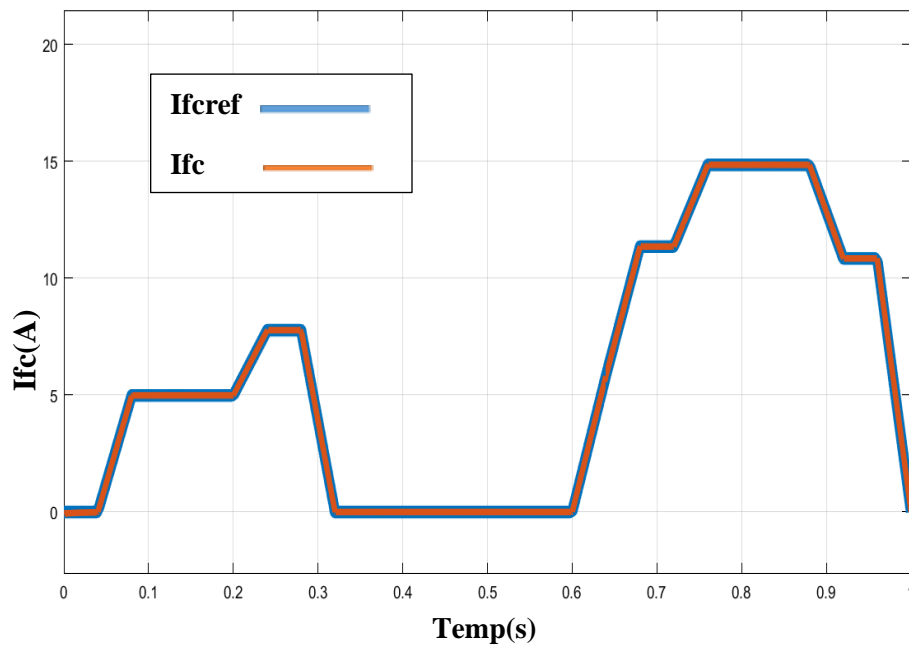


Figure III.10 : Courant du stack de piles à combustible et sa référence

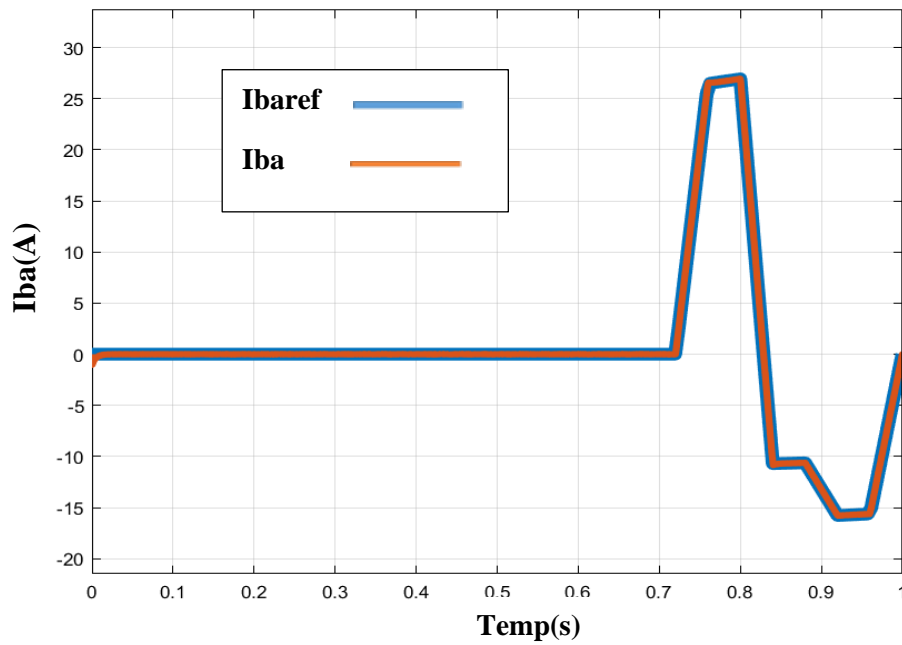


Figure III.11 : Courant du stack de batteries et sa référence

III.7.4. Tensions du système

Les Figure III.12, III.13, représente les tensions du stack de pile a compatible et stack de batteries et, sont tracées graphiquement en fonction du temps sur les figures mentionnées avec leur référence.

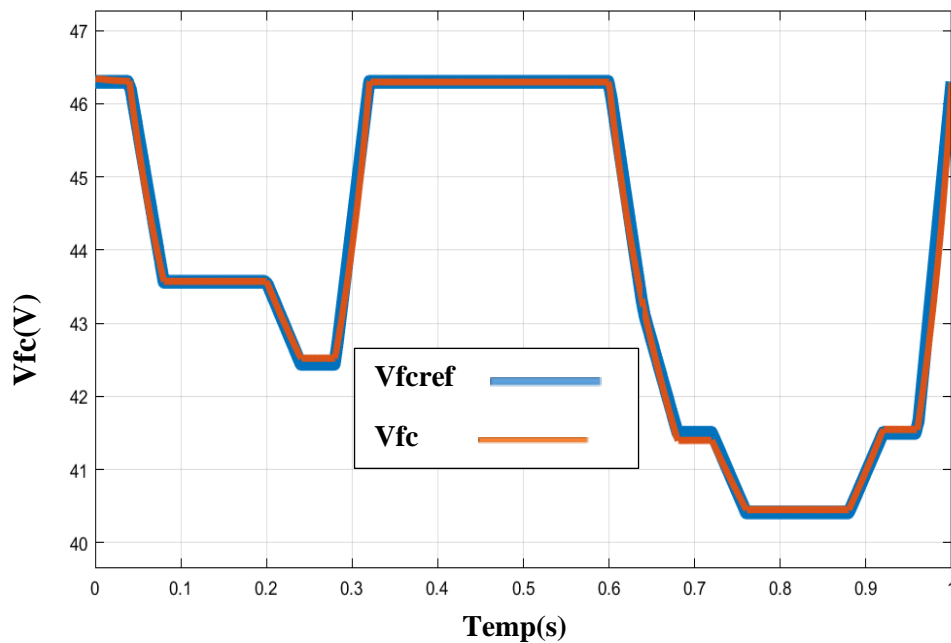


Figure III.12 : Tension du stack de piles à combustible et sa référence

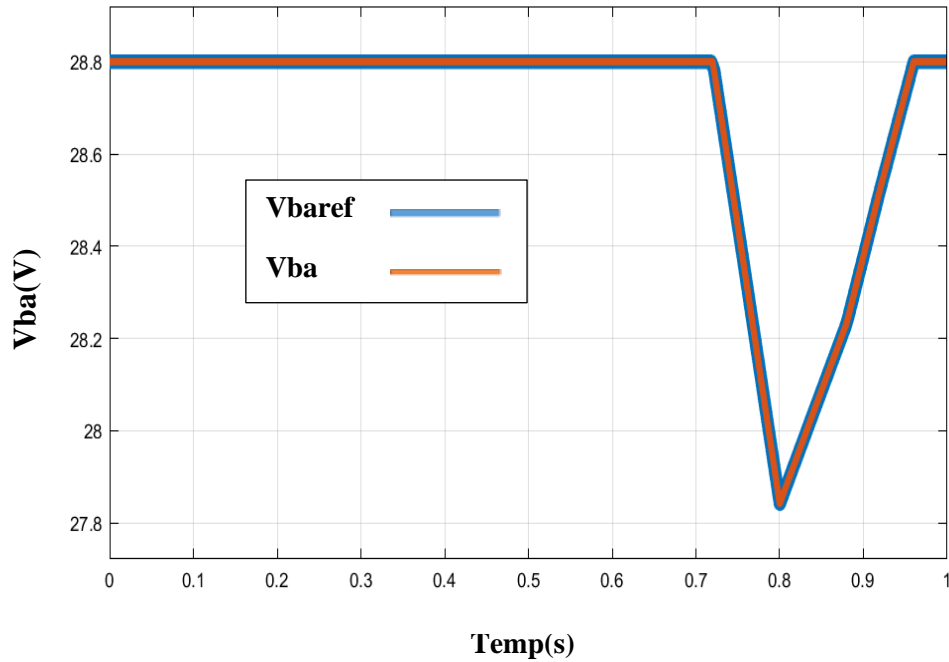


Figure III.13 : Tension du stack de batteries et sa référence

Ainsi, la figure III.14 représente le pourcentage de charge et de décharge de la batterie au cours du temps. En observant la figure, il y a une diminution progressive de la valeur de la batterie lorsqu'elle est utilisée. En effet, la batterie fournit de l'énergie pour le fonctionnement de la charge et est chargée lorsqu'un excès d'énergie est disponible.

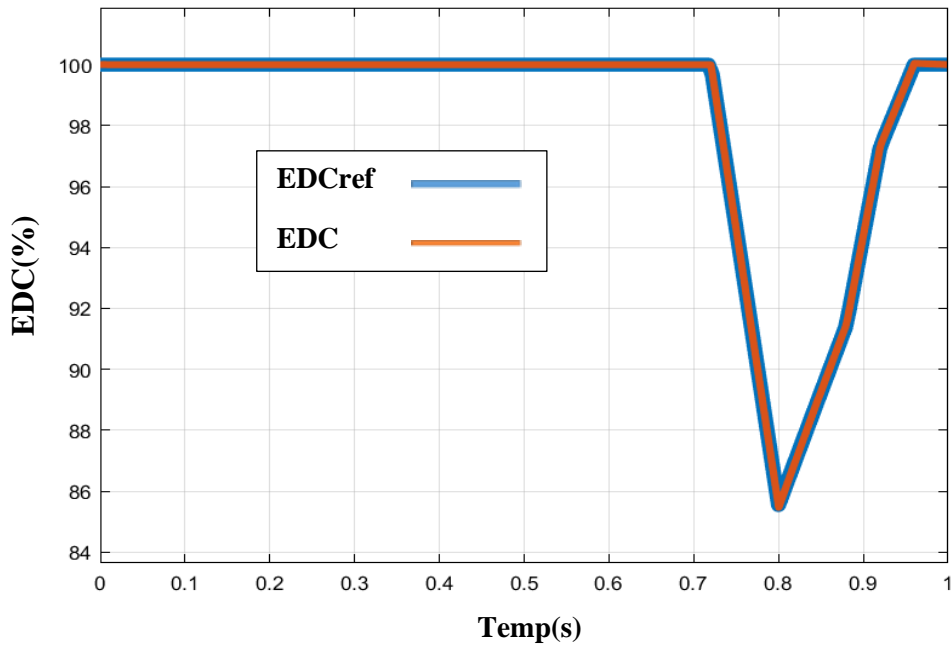


Figure III.14 : Etat de charge du stack de batteries et sa référence

III.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné en détail un système de gestion hybride autonome en énergie qui offre une stratégie d'alimentation de charge efficace. Ce système est conçu pour répondre aux besoins énergétiques d'une charge en utilisant trois sources d'énergie différentes : le photovoltaïque, les piles à combustible et les batteries.

La source photovoltaïque est considérée comme la principale source d'énergie dans ce système. Cependant, il peut y avoir des situations où la source photovoltaïque n'est pas suffisante pour répondre aux besoins énergétiques de la charge. Pour faire face à ces situations, le système est équipé de piles à combustible.

Les piles à combustible agissent comme une source d'énergie alternative en l'absence de la source photovoltaïque ou lorsque celle-ci est incapable de fournir suffisamment d'énergie. Enfin, le système dispose également de batteries pour assurer une alimentation continue de la charge. Les batteries sont utilisées lorsque la source photovoltaïque et les piles à combustible ne sont pas disponibles ou ne peuvent pas répondre à la demande énergétique.

En résumé, ce chapitre explore en détail un système de gestion hybride autonome en énergie qui utilise le photovoltaïque, les piles à combustible et les batteries pour alimenter une charge. Ces différentes sources d'énergie permettent de s'adapter aux variations de disponibilité de l'énergie solaire et d'assurer un approvisionnement continu en électricité.

Conclusion générale

Conclusion générale

La mémoire "Gestion d'Énergie d'un Système Hybride «Générateurs PV /Piles à Combustible /Batteries »" se concentre sur le développement d'un algorithme de gestion d'énergie efficace pour optimiser l'utilisation de ces trois sources dans le système hybride.

Dans le premier chapitre, une introduction générale a été donnée sur les systèmes hybrides autonomes et leur importance croissante dans le contexte de la transition énergétique. Il met en évidence les avantages des systèmes hybrides et présente les trois sources d'énergie principales utilisées dans le système : les piles à combustible, la source photovoltaïque et les batteries. Leur contribution à la production d'énergie est également abordée.

Le deuxième chapitre se concentre sur le dimensionnement et la modélisation des composants du système hybride. Il explique en détail comment les convertisseurs statiques DC-DC d'interface sont utilisés pour connecter les différentes sources d'énergie au bus continu de sortie du système. Ces convertisseurs permettent les transferts d'énergie entre les sources, la charge et les éléments de stockage, assurant ainsi un fonctionnement efficace du système.

Le troisième chapitre est consacré à la proposition et à l'analyse de l'algorithme de gestion d'énergie. L'objectif de cet algorithme est d'optimiser l'utilisation des trois sources d'énergie en fonction des conditions environnementales et de la demande électrique. Des simulations sont réalisées pour évaluer les performances de l'algorithme et démontrer son efficacité dans l'optimisation de la gestion de l'énergie dans le système hybride.

Et Parmi les résultats obtenus :

→ Indépendance énergétique : en combinant panneaux solaires piles à combustible, et batteries, le système hybride offre une plus grande indépendance énergétique. Les sources d'énergie renouvelables et les dispositifs de stockage les aident à ne pas dépendre des réseaux électriques extérieurs, ce qui peut être particulièrement utile dans les zones isolées.

→ Indépendance énergétique : en combinant panneaux solaires piles à combustible, et batteries, le système hybride offre une plus grande indépendance énergétique. Les sources d'énergie renouvelables et les dispositifs de stockage les aident à ne pas dépendre des réseaux électriques extérieurs, ce qui peut être particulièrement utile dans les zones isolées.

An orange rounded rectangle with a slight gradient and a thin dark border, centered on a white background. It contains the text 'Références bibliographiques' in a black serif font.

Références
bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Hamane Zahia,Hassani Hanane.étude d'un système hybride pv/pac/ batteries.[Mémoire de Master]. Bejaia : Université A.Mira, Faculté de technologie ; 2018.
- [2] M.Rabah Rouas.étude d'un système hybride éolien-photovoltaïque.[Thèse de Doctorat].Tizi-Ouzou : L'universite De Mouloud Mammeri, Faculte de génie électrique et d'informatique ; 2018.
- [3] Djouhri Oussama,Hadjadj Ahmed Yassine.Gestion d'énergie d'un système hybride« piles à combustible/source photovoltaïque/batteries».[Mémoire De Master] Ouargla : Université De Kasdi Merbah Ouargla, Faculté des Sciences Appliquées ; 2021.
- [4] Habi Hafidha,Bibi Yamina.Simulation et Optimisation des performances d'un système hybride intégrant des Energies renouvelables pour la génération d'Electricité.[Mémoire De Master], Bouira : De Université De Bouira, Faculté des sciences et des Sciences Appliquées ; 2016.
- [5] <https://lesjoyeuxrecycleurs.com/lexique/energie-renouvelable/>
- [6] Bengourain Issam .Représentations des systèmes hybrides à énergie renouvelables. [Mémoire De Master], Tlemcen : Université De Aboubakr Belkaïd, Faculté de Technologie ; 2022.
- [7] Mebrouki Abdallah,Djaafri Abdelkrim.Étude d'un système hybride cas de centrales kabertene. [Mémoire De Master], De Université -Adrar – Faculté des Sciences et de la technologie 2016.
- [8] Kouache Ahmed Zouhir,Rehouma Lakhdar. Contribution à la modélisation optimale des piles à combustible de type pem par utilisation des méthodes méta-heuristiques.[Mémoire De Master], Ouargla : Université Kasdi Merbah, Faculté des Sciences appliquées ; 2020.
- [9] Zairi Soufiane,Boubiada Slimane. Etude et dimensionnement d'une centrale photovoltaïque. [Mémoire De Master], Biskra : Université De Mohamed Khider, Faculté des Sciences et de la technologie ; 2020.
- [10] Cuong Hung Tran.Ameliorations d'une chaine de conversion de l'énergie solaire en électricité autonome en vue d'application dans les pays en voie de développement.[Thèse De Doctorat], De Université De Reims Champagne-Ardenne, Ecole doctorale sciences technologie sante ; 2019.

[11] Hadjadj Razika ep.Assabaa. Modélisation numérique tridimensionnelle des processus physico-chimiques dans une pile à combustible à membrane échangeuse de protons.[Thèse De Doctorat] Constantine 1 : Université De Des Freres Mentouri, Faculté des Sciences exactes ; 2019.

[12] Benaouadj Mahdi.Gestion de l'énergie d'un système hybride autonome pour application (smart grid). [Thèse De Doctorat], Biskra : Université de mohamed khider ; 2016

[13] Mahdi Benaouadj.Contrôle d'une source hybride batteries/super condensateurs, rechargée par l'énergie photovoltaïque, pour traction électrique (véhicule hybride).[Mémoire De Master], Université d'El-Oued ; 2012

[14] Zerrouki Ahmed.abd Elmouaiz, Benlamoudi Zinedine. Gestion d'energie d'un système hybride« piles à combustible /batteries ». [Mémoire De Master], Ouargla : Université De Kasdi Merbah, Faculté des Sciences appliquées ; 2021.