

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Electrique

Spécialité : Réseaux électrique

THÈME

SUPERVISION ET GESTION OPTIMALE D'UN SYSTEME HYBRIDE AUTONOME

(PV/ PILE A COMBUSTIBLE/ BATTERIE/ SUPER CONDENSATEUR)

Préparé par : **BOUKHATEM Salma**
BENMOUMEN Abdessamad Ilyes

Devant le Jury :

Nom et prénoms	Grade	Qualité
BERKANI. A	MCA	Président
NEGADI.K	Pr	Examineur
BOURENANE.H	MAA	Examineur
KOULALI .M	MCB	Encadreur
ARARIA. R	MCB	Co-Encadreur

Année universitaire: 2022/2023

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier ALLAH le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce travail. En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur Ms koulali Mostefa, son précieux conseil et son aide durant toute la période du travail. Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre mémoire en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions. Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.



Dédicaces

*A nos chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour,
leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de
mes études.*

*A mes chères amies de promo pour leur appui et leur
encouragement,*

*A toute la famille **BOUKHATEM**, et **MOULAYETTE**, pour
leur soutien tout au long de notre parcours universitaire,*

Pour MARWA et RACHA et FATIHA

*Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant
allégués, et le fruit de votre soutien infailible.*

Merci d'être toujours là pour moi.

BOUKHATEM. S

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à mon cher parent,
Qui n'a jamais cessé de formuler des prières à
mon égard de me soutenir et de m'épauler pour
que je puisse atteindre mes objectifs.*

A mes chers frères Zakaria et Abdeljalil.

*A tous mes chers amis pour leurs
indéfectibles soutiens, pour leurs conseils
précieux tout au long de mes études.*

A mon binôme Boukhatem Salma.

*A mes chers amis de ma promo et chikh Riad
sahby.*

Benmoumene Abdessamad Ilyes

TABLE DES MATIERES



Table des matières

Introduction générale

Chapitre I: état de l'art sur les énergies renouvelable et les systèmes de production hybrides

I.1 Introduction	2
I.2 Les énergies renouvelables	2
I.2.1 Définition	2
I.2.2 Différentes ressources des énergies renouvelables	2
I.2.2.1 Énergie Photovoltaïque	2
I.2.2.2 Solaire	3
I.2.2.3 Éolienne.....	3
I.2.2.4 La géothermie.....	4
I.2.2.5 Biomasse	4
I.2.2.6 Hydraulique.....	5
I.3 Principes de production de l'énergie photovoltaïque	6
I.3.1 Définition de la cellule photovoltaïque.....	6
I.3.2 Principe de fonctionnement de photovoltaïque.....	7
I.3.3 Association des cellules photovoltaïque.....	8
I.3.3.1 Association en série.....	8
I.3.3.2 Association en parallèle.....	8
I.3.3.3 Association mixte (en série et en parallèle).....	8
I.3.4 Les modules photovoltaïques.....	8
I.3.5 Générateur Photovoltaïque.....	9
I.4 Système hybride	9
I.4.1 Définition.....	9
I.4.2 Importance de l'hybridation.....	10

I.4.3	Avantages et inconvénients d'un système hybride.....	11
I.4.4	Classification des systèmes d'énergie hybride	11
I.4.4.1	Le régime du fonctionnement	11
I.4.4.2	La structure du système hybride.....	11
I.4.5	Configuration des systèmes hybrides.....	12
I.4.5.1	Architecture à bus continu.....	12
I.4.5.2	Architecture à bus alternatif.....	13
I.4.6	Critères d'optimisation du système hybride.....	14
I.4.7	Différents structures de systèmes hybrides.....	15
I.4.7.1	Systèmes hybrides avec source conventionnelle.....	15
I.4.7.1.1	Systèmes photovoltaïque/source conventionnelle.....	15
I.4.7.2	Systèmes hybrides sans source conventionnelle.....	16
I.4.7.2.1	Systèmes hybrides photovoltaïque/stockage.....	16
I.5	La Pile à combustible.....	17
I.5.1	Les différents types de piles à combustible.....	18
I.5.2	Principe de fonctionnement.....	18
I.5.3	Eléments de base d'une cellule élémentaire de PAC.....	20
I.6	Systèmes de stockage.....	21
I.6.1	Les Batteries.....	22
I.6.1.1	Principe de fonctionnement d'une batterie.....	23
I.6.1.2	Types des batteries.....	23
I.6.2	Les super condensateurs.....	25
I.6.2.1	Structure et fonctionnement des super condensateurs.....	25
A)	Etat en charge.....	26
B)	Etat déchargé.....	26

I.6.2.2 Les avantages et les inconvénients.....	26
I.7 La différence entre la batterie et super-condensateur.....	27
I.8 Les convertisseurs statiques.....	27
I.8.1 Types de convertisseurs statiques.....	28
I.8.2 Les familles de hacheurs.....	28
I.8.2.1 Convertisseur Buck.....	28
I.8.2.2 Convertisseur boost.....	29
I.8.2.3 Le convertisseur Buck-Boost.....	29
I.9 Conclusion.....	30

Chapitre II : Modélisation des éléments du système hybride

II.1 Introduction.....	31
II.2 Modélisation de la chaîne de production photovoltaïque.....	31
II.2.1 Module photovoltaïque utilisé.....	32
II.2.2 Modélisation d'un générateur photovoltaïque.....	32
II.2.3 Caractéristiques de module photovoltaïque.....	34
II.2.3.1 Courant de court-circuit (I_{cc}).....	35
II.2.3.2 Tension de circuit ouvert (V_{oc}).....	36
II.2.3.3 Puissance optimale et facteur de forme.....	36
II.2.4 constitution d'un générateur photovoltaïque.....	36
II.2.4.1 Association des cellules photovoltaïques.....	37
II.2.4.2 Influence des paramètres météorologiques sur les caractéristiques du module PV.....	37
II.3 Modélisation de la pile à combustible.....	39
II.3.1 Principe de fonctionnement.....	39
II.3.2 Représentation électriques de la pile.....	39
II.3.3 Caractéristique tension/densité de courant.....	41

II.3.4 Modélisation du hacheur boost (élevateur).....	43
II.4.Modélisation des éléments de stockage :	44
II.4.1 Modélisation de la batterie.....	44
II.4.1.1 Modélisation du convertisseur DC-DC côté unité de stockage.....	44
II.4.2 modélisation de super-condensateur.....	45
II.5 Modélisation Bus Continu.....	47
II.6 Conclusion.....	47

Chapitre III : optimisation et gestion des éléments du système hybride

III.1 Introduction.....	49
III.2 Description du schéma d'énergie proposé pour cette étude.....	50
III.3 Motivation du point de vue des techniques de contrôle.....	50
III.4.Contrôle de la chaine photovoltaïque.....	51
III.4.1 Contrôle du GPV.....	51
III.4.2.Les technique de contrôle MPPT.....	52
III.4.2.1 Principe de la recherche du point de puissance maximal	52
III.4.2.2 Les commandes MPPT classique.....	54
a) Méthode de perturbe et d'observe (P&O)	54
b) Technique d'Incrémental Conductance (IC)	55
III.4.2.3 Techniques d'optimisations méta-heuristiques (Optimisation d'essaim de particules (PSO)).....	57
III.4.3 Résultats de simulation et interprétations	59
III.5 Contrôle de la pile à combustible.....	62
III.5.1 Dimensionnement	62
III.5.2. Modèle et circuit de commande de la PAC.....	63
III.5.3 Résultats de simulation et discussions.....	65

III.6. contrôle de l'énergie du système de stockage hybride.....	66
III.6.1 Contrôle de la batterie	66
III.6.1.1 système de commande	66
III.6.1.2 Résultats de simulation et interprétations.....	68
III.6.2 Contrôle de super condensateur	70
III.6.2.1 système de commande	70
III.7 Contrôle du bus DC.....	70
III.7.1 Description.....	70
III.7.2 Résultats de simulation.....	73
III.8 Charge	74
III.9 Système de supervision et de gestion.....	75
III.9.1 Schéma de supervision du SEH.....	75
III.9.2 Organigramme de gestion.....	77
III.9.3 Modes et scénarios du fonctionnement du système hybride.....	78
III.9.4 Résultats de simulation et de gestion de notre système hybride	80
III.10 Conclusion.....	83
Conclusion générale	85
Bibliographie	

Chapitre I: état de l'art sur les énergies renouvelable et les systèmes de production hybrides

Figure I.1: Principe de l'énergie photovoltaïque	3
Figure I.2 : Principe de l'énergie éolienne	4
Figure I.3 : Principe de l'énergie géothermique	4
Figure I.4 : Principe de l'énergie biomasse	5
Figure I.5: Principe de l'énergie hydraulique	5
Figure I.6: cellule photovoltaïque	6
Figure I.7 : Principe de fonctionnement d'une cellule PV	7
Figure I.8 : Générateur photovoltaïque.	9
Figure I.9 : Structure d'un système hybride	10
Figure I.10 : classification du système hybride.	12
Figure I.11 : configuration du système hybride à bus continu.	12
Figure I.12: configuration du système hybride à bus Alternatif..	13
Figure I.13 : système hybride avec connexion série.	15
Figure I.14 : Système hybride avec connexion parallèle	16
Figure I.15 : Système hybride photovoltaïque/stockage.	17
Figure I.16 : Pile à combustible	17
Figure I.17 : Schéma du principe de fonctionnement d'une pile à combustible	20
Figure I.18 : Eléments de base pile a combustible	20
Figure I.19 : Composants d'une batterie	22
FigureI.20 : Principe d'un accumulateur électrochimique	23
FigureI.21 : Batteries plomb-acide	24
FigureI.22 Batteries Nickel-Cadmium	25
Figure I.23 : schéma de super-condensateur	25
Figure I.24: Schéma du convertisseur Buck	29
Figure I.25 : schéma équivalente du convertisseur boost	29

Chapitre II : Modélisation des éléments du système hybride

Figure II.1: Structure du système à énergie hybride (photovoltaïque, pile à combustible) avec stockage.	31
Figure II.2 : Schéma synoptique du système photovoltaïque	32
Figure II.3 : Modèle électrique du circuit électrique équivalent d'un PV.	32
Figure II.4 : Caractéristique courant-tension d'un module photovoltaïque	35
Figure II.5 : Caractéristique puissance-tension d'un module photovoltaïque	35
Figure II.6 : Caractéristique (I-V) et (P-V) pour différents éclaircissement	37
Figure II.7 : Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ pour différentes températures	38
Figure II.8: Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ d'un module photovoltaïque pour différentes valeurs de la résistance série	38
Figure II.9: Représentation électrique d'une pile à combustible	39
Figure II.10 : Caractéristique $V_{pac}(I_{pac})$ et $P_{pac}(I_{pac})$ a $T=25^{\circ}C$	42
Figure II.11 : Caractéristique $V_{pac}(I_{pac})$ et $P_{pac}(I_{pac})$ pour différentes températures	42
Figure II.12 : schéma de Convertisseur Boost	43
Figure II.13: Modèle R-C de la batterie	44
Figure II.14 : Schéma d'un hacheur Buck-Boost	45
Figure II.15: Schémas électriques équivalents d'un super-condensateur.	46
Figure II.16: Modèle du bus continu	47

Chapitre III : optimisation et gestion des éléments du système hybride

Figure III.1: Synoptique du système hybride étudié connecté à une charge alternative	50
Figure III.2: Classification des techniques de contrôle utilisées dans les systèmes hybrides	51
Figure III.3: Convertisseur boost avec contrôle MPPT	52
Figure III.4: Recherche de recouvrement du point de puissance maximale	53
Figure III.5: Caractéristique de puissance dans la P&O	54

Figure III.6: Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation	55
Figure III.7 : Caractéristique de l'Incrémentale Conductance	56
Figure III.8: Organigramme de l'algorithme Incrémentation de la conductance	57
Figure III.9 : Organigramme de la PSO	58
Figure III.10: Caractéristiques électriques du générateur photovoltaïque en utilisant les trois techniques MPPT choisies pour un ensoleillement variable	60
Figure III.11 : Tension et puissance de charge obtenus par les trois techniques MPPT choisies	61
Figure III.12: Convertisseur survolteur (Boost) connecté à la pile à combustible	62
Figure III.13: Schéma fonctionnel de la modélisation et du contrôle du conditionnement de puissance	64
Figure III.14: courant délivrés par la PAC	65
Figure III.15: Contrôle de la batterie	66
Figure III.16: Schéma de contrôle pour le convertisseur côté stockage rattaché à la batterie	67
Figure III.17 :le courant de charge global (total) SOC	68
Figure III.18: Courant et SOC de la batterie	69
Figure III.19 : Schéma de contrôle de l'énergie d'un système de stockage hybride	70
Figure III.20: Tension du bus continu, tension et courant à la sortie	74
Figure III.21: Tensions triphasés de la charge	74
Figure III.22 : Zoom des tensions triphasés de la charge	75
Figure III.23: courants triphasés de la charge	75
Figure III.24 : Schéma de supervision du SEH proposé	76
Figure III.25 : Organigramme de supervision de gestion	78
Figure III.26 : Gestion de puissance du système hybride	80
Figure III.27 : les différents modes de gestion de système hybride	84

Liste des tableaux

Chapitre I: état de l'art sur les énergies renouvelable et les systèmes de production hybrides

Tableau I.1 : Avantages et inconvénients d'un système hybride	11
Tableau I.2:Les différents types de pile à combustible	18
Tableau I.3 : Caractéristiques des différentes technologies de stockage	22
Tableau I.4 : Performances de stockage	27

Chapitre II : Modélisation des éléments du système hybride

Tableau II.1 : Comparaison entre l'association série/ parallèle des cellules photovoltaïques	37
--	----

Chapitre III : optimisation et gestion des éléments du système hybride

Tableau III.1: Cas du fonctionnement de l'algorithme P&O	55
--	----

Symboles et notations

Panneaux

I_g: Le courant de sortie du générateur [A].

V_g : La tension de sortie du générateur [V].

I_L : le courant photonique [A].

I₀ : le courant de saturation inverse [A].

γ : le facteur de qualité.

R_S : la résistance série [Ω].

K : Constante de Boltzmann, $K = 1.3854 \cdot 10^{-23}$ [J/K].

q : Constante de charge d'électron, $q = -1.602 \cdot 10^{-19}$ [C].

I : Le courant délivré par le module [A].

I_{ph}: Photo courant [A].

I_d : Courant de diode [A].

I_{sh}: Le courant shunt [A].

Noct: Condition de température nominale de fonctionnement de la cellule qui est donnée par le constructeur (45°C).

I : Le courant de cellule [A].

V : La tension de cellule [V].

R_S: La résistance série de la cellule [Ω].

E_G : L'ensoleillement (irradiation solaire) [W/m^2].

E_{réf}: Irradiation de référence 1000 [W/m^2].

T_j: La température de jonction de la cellule [°C].

T_{jréf}: La température de jonction de référence [°C].

T: La température ambiante [°C].

I_s : Le courant de saturation [A]

n : Le facteur de qualité de la diode.

A: Coefficient d'idéalité de la cellule.

E_g: Énergie de gap

N_s : Nombre des panneaux en séries.

N_P : Nombre des panneaux en parallèle.

Batterie:

C_{bat} : La capacité nominale de la batterie [Ah].

Q_{bat}: La quantité de charge [C] manquante par rapport à **C_{bat}**.

Symboles et notations

E_0 : f.e.m de la batterie [V].

R_s : Résistance sériée de la batterie [Ω]

I_b : Courant de batterie [A].

$I_{bréf}$: Courant de référence [A].

V_{bat} : Tension de la batterie [V].

R_s : Résistance sériée de la batterie [Ω]

E_{bat} : Énergie de la batterie [Wh/jour].

N_j : Nombre de jours d'autonomie de la batterie.

η_{bat} : Rendement de la batterie.

D : Profondeur de la batterie.

E_0 : f.e.m de la batterie [V].

E_0' : f.e.m de group des batteries [V].

C_0' : Capacité nominale de group des batteries [Ah].

R_s' : Résistance série de groups des batteries [Ω].

V_{dc} : Tension de bus [V].

$V_{dc,ref}$: Tension de référence [V].

Pile à combustible :

E_{Nernst} : Tension de Nernst [V].

V_{act} : Polarisation d'activation [V].

V_{ohm} : Polarisation ohmique [V].

V_{conc} : Polarisation de concentration [V].

T : Température opératoire absolue de la pile [K].

P^*H_2 : Pressions partielles à l'interface de l'hydrogène [atm].

P^*O_2 : Pressions partielles à l'interface de l'oxygène [atm].

Symboles et notations

I_0 : Courant d'échange définissant à vide les échanges électrode – électrolyte [A].

I_n : Courant interne permettant de tenir compte d'une éventuelle traversée de gaz et/ ou d'électrons à travers l'électrolyte [A].

Δ : Pente de la droite de « Tafel ».

R_m : Résistance totale de la pile à combustible [Ω].

B : Constante de transport ou de transfert de masse.

IFC : Densité du courant de fonctionnement permanent [A/cm²].

I_{lim} : Densité du courant limite [A].

Super condensateur

r_{sc} : la résistance en série équivalente totale dans le convertisseur de super- condensateur

ζ : Coefficient d'amortissement

ω_n : Coefficient de pulsation

p_{ch} : Puissance de charge

INTRODUCTION GÉNÉRALE



I. Introduction générale :

Les énergies renouvelables sont un ensemble des sources naturelles telles que le soleil, du vent, de la chaleur de la terre ou bien extraire d'une source naturel comme l'hydrogène qui peut produire à partir de reformage du gaz naturel (conversion de molécules à l'aide de réactions chimiques par de la vapeur d'eau surchauffée) avec un rendement d'environ 80 % et peut aussi à partir l'électrolysations de l'eau. Les énergies renouvelables offrent des nombreux avantages, tel que inépuisables, gratuites et sont compatibles avec certain respect environnemental. Cependant une des propriétés qui limite son utilisation, est due leurs capacité de remplacé de suivi les fluctuations de la charge demandé et leurs faible autonomie, la solution à retenir est l'assemblage de plusieurs sources d'énergie, afin de constituer les systèmes d'énergies hybrides.

Parmi ces différents moyens de générer de l'électricité, l'énergie solaire photovoltaïque est la plus utilisée. Elle présente l'avantage de s'intégrer facilement à l'habitat (façades de bâtiments, toits). L'absence de pièces mécaniques mouvantes réduit l'entretien de ces systèmes à un minimum et leur fiabilité (durée de vie d'environ 25 ans) a rapidement favorisé leur utilisation dans différentes applications.

Notre travaille se structure en trois chapitres :

Dans le premier chapitre nous avons vu les différentes ressources des énergies renouvelables, les Principes de production de l'énergie photovoltaïque, Ensuite, nous avons abordé les différents groupements possibles des cellules. (GPV) et défini son rendement et le Facteur de forme. Apres on a motionnés l'importances des systèmes hybrides et leur critères d'optimisation avec la pile à combustibles ainsi le système de stockages qui contient la batterie et super-condensateur on a aussi étudier les convertisseurs DC-DC (hacheurs séries)

Le second chapitre est consacré quant à lui, à la modélisation statique des différents éléments qui composent notre système notamment la cellules photovoltaïque ,la pile à combustible, la batterie le super-condensateur, ainsi que les éléments d'électroniques de puissance convertisseur DC/DC Boost et Buck-Boost utilisés pour ce système,

Le troisième chapitre propose un schéma global de gestion du flux énergétique du système hybride photovoltaïque / pile à combustible/batterie /super condensateur avec les quelque techniques d'optimisations classiques de MPPT (P&O, IC et PSO), afin de les appliquer dans un système photovoltaïque où les résultats de simulations sous différents scénarios sont donnés et discutés. Comme il présente l'ensemble des résultats dissimulation obtenus au cours de cette étude. Enfin, nous terminons par une conclusion générale et des perspectives pour de futurs travaux.

CHAPITRE I

ÉTAT DE L'ART SUR LES ÉNERGIES RENOUVELABLE & LES SYSTEME HYBRIDES



I.1 Introduction

Le secteur des énergies renouvelables a enregistré une croissance remarquable ces dernières années et a connu un grand succès grâce aux progrès technologiques et à la prise de conscience mondiale de l'abandon des sources fossiles, nous concentrons dans ce chapitre, sur les sources les plus importantes d'énergies renouvelables et qui constituent vraiment une solution alternative pour répondre aux besoins de la société.

Parmi les systèmes les plus prometteurs pour l'utilisation des énergies renouvelables, il y a les Systèmes d'Énergie Hybrides Pour les régions isolées ou éloignées, ce terme fait allusion aux systèmes de génération d'énergie électrique utilisant plusieurs types de sources. [1]

Dans le présent chapitre, nous allons présenter les différentes ressources des énergies renouvelables et en particulier l'énergie photovoltaïque. Cette dernière est la source d'énergie principale pour notre centrale étudiée. Ensuite, nous allons entamer le principe du fonctionnement du système d'énergie hybride, en introduisant l'architecture du système hybride proposée pour notre étude.

I.2 Les énergies renouvelables

I.2.1 Définition

L'énergie renouvelable est une énergie dérivée de sources naturelles qui se renouvellent à un rythme supérieur à ce qui est consommé. La lumière du soleil et le vent, par exemple, sont des sources constamment renouvelées. Les sources d'énergie renouvelables sont abondantes et sont tout autour de nous. Une énergie est dite renouvelable lorsqu'elle provient de sources que la nature renouvelle en permanence, par opposition à une énergie non renouvelable dont les stocks s'épuisent.

I.2.2 Différentes ressources des énergies renouvelables

Il y a principalement six sources d'énergie :

I.2.2.1 Énergie Photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancées sur le plan technologiques et industriel, en effet le silicium est l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique.[3].



Figure I.1: Principe de l'énergie photovoltaïque [19]

I.2.2.2 Solaire

Le soleil reste jusqu'à présent la plus importante source d'énergie malgré la distance considérable qui le sépare de la terre ($150 * 10^6$ km). La puissance émise par le soleil sous forme de rayonnement est estimée à $90 * 10^{15}$ GW, alors que la couche terrestre n'arrive à recevoir que $180 * 10^6$ GW. Avant d'arriver à la terre, le rayonnement solaire subit de considérables modifications, dues principalement aux phénomènes d'absorption et de diffusion. Aussi, on introduit la notion de l'éclairement qui est la densité de puissance reçue par une surface soumise à un flux lumineux, dans les conditions atmosphériques optimales. Cette densité de puissance atteint 1 kW/m^2 pour un site situé au niveau de la mer [4], [5].

Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface terrestre, et ce, malgré une atténuation importante à la traversée de l'atmosphère; la quantité qui reste est encore assez importante, quand elle arrive au sol. On peut ainsi compter sur 1000 W/m^2 crête dans les zones tempérées et jusqu' à 1400 W/m^2 lorsque l'atmosphère est faiblement polluée. L'énergie solaire est convertie en électricité à l'aide d'installation Photovoltaïque (PV) qui permet de transformer le rayonnement solaire en courant continu.[6].

I.2.2.3 Éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice [14].Le couplage mécanique peut être soit direct si la turbine et la génératrice ont des vitesses du même ordre de grandeur, soit réalisé par l'intermédiaire d'un multiplicateur dans le cas contraire.[15]



Figure I.2 : Principe de l'énergie éolienne [15]

I.2.2.4 La géothermie

La géothermie (mot issu du grec « géo » = terre et « thermos » = chaud) est la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre. C'est aussi l'ensemble des applications techniques qui permettent d'exploiter les sources d'énergie géothermique.

La géothermie est disponible en permanence. Elle ne dépend pas des conditions climatiques (soleil, pluie, vent) des saisons ou des heures de la journée. Les gisements géothermiques sont une durée de vie de plusieurs dizaines d'années [7].

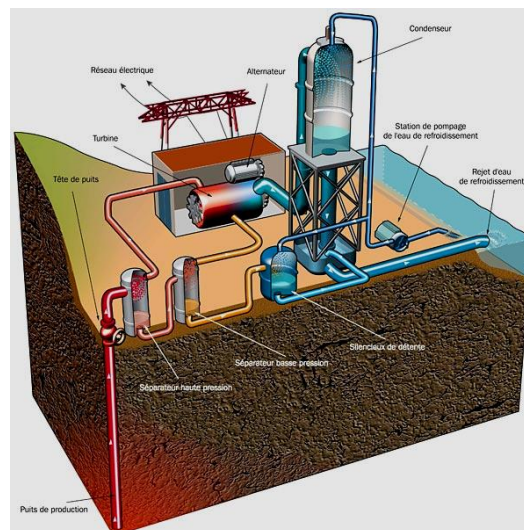


Figure I.3 : Principe de l'énergie géothermique [7]

I.2.2.5 Biomasse

La biomasse est la fraction biodégradable des produits, des déchets et des résidus d'origine biologique provenant de l'agriculture et de l'élevage des animaux, de la pêche et l'aquaculture, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et municipaux. La biomasse peut être utilisée principalement de deux manières :

- ❖ Lors de la fermentation des déchets, le gaz méthane peut être capté et utilisé comme source d'énergie,
- ❖ La biomasse elle-même peut être incinérée.

Dans tous les deux cas, l'énergie thermique peut être utilisée pour produire de l'électricité dans des centrales thermiques. L'intérêt est que le dioxyde de carbone rejeté dans l'atmosphère lors de l'incinération de la biomasse ou le méthane est compensé par celui absorbé par la repousse des plantes qui, entre autre, sont la source principale de biomasse. De cette manière, le bilan carbone peut être proche de zéro [8]

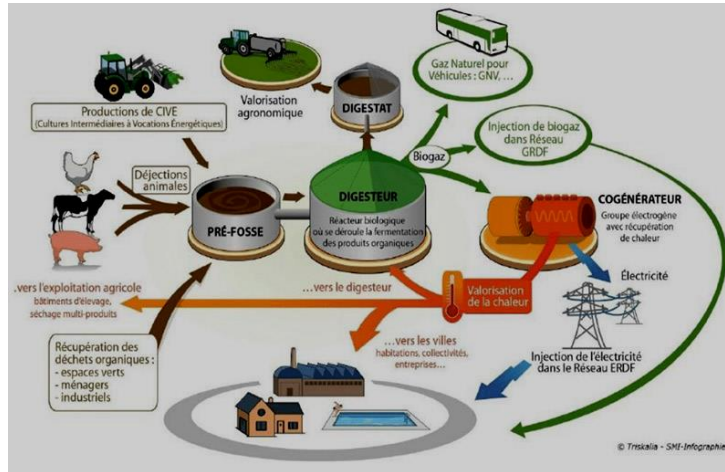


Figure I.4 : Principe de l'énergie biomasse [8]

I.2.2.6 Hydraulique

L'hydroélectricité, c'est-à-dire la production d'électricité à partir de la force de l'eau, est apparue au milieu du XIXe siècle dans la continuité des moulins qui exploitaient directement la force motrice de l'eau. Appelée la "houille blanche", elle a été synonyme d'un développement économique très important.[9]

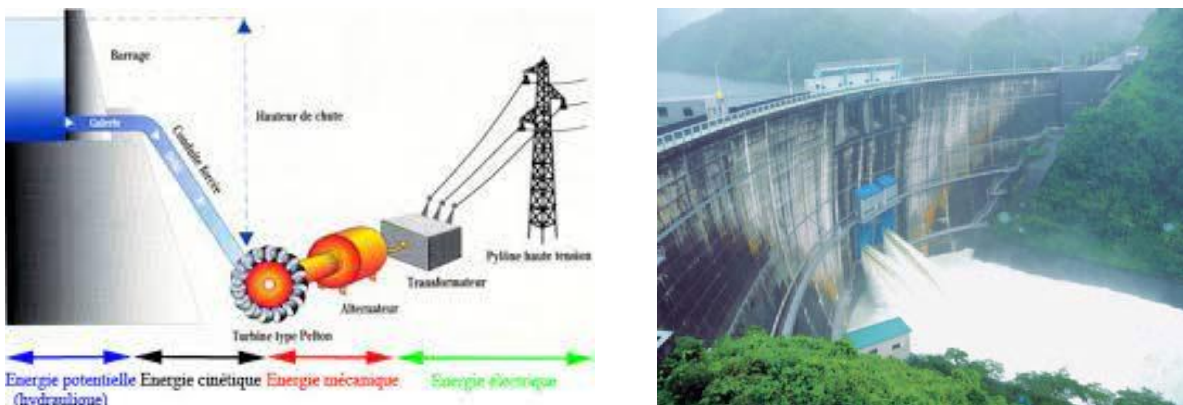


Figure I.5: Principe de l'énergie hydraulique [9]

L'énergie électrique est produite par la transformation de l'énergie cinétique de l'eau en énergie électrique par l'intermédiaire d'un rotor alternatif relié à un ensemble mécanique situé autour de la roue motrice. La quantité d'énergie extraite de l'eau retenue derrière un barrage dépend

du volume d'eau et de la hauteur de chute. Cette source à l'avantage de ne pas être polluante. On peut maîtriser le stockage de l'énergie d'une manière assez simple afin de débarrasser les cours d'eau des déchets grâce aux différents filtres des barrages, la technologie nécessaire pour son utilisation est maîtrisée. Le bruit, l'impact sur la vie aquatique, des installations complexées, et des sites limités pour l'exploitation sont ses principaux inconvénients [10]

I.3 Principe de production de l'énergie photovoltaïque

I.3.1 Définition de la cellule photovoltaïque

Une cellule solaire est un dispositif semi-conducteur photosensible fabriqué en couches minces. Lorsque les radiations électromagnétiques solaires sont incidentes sur elle, de l'électricité est produite par effet photovoltaïque. Lorsque la cellule PV est exposée au soleil, des porteurs de charge sont produits qui créent un courant électrique si le circuit est fermé. Des charges sont générées lorsque l'énergie incidente du photon est suffisante (ayant une énergie supérieure à l'énergie de la bande interdite de l'électron) pour déplacer l'électron covalent du semi-conducteur. De ce fait, un champ électrique interne est créé. Ce champ électrique interne entraîne la séparation des porteurs de charge de charge opposée. Le mouvement de ces porteurs de charge crée un courant, appelé photo courant. Une cellule PV présente essentiellement des caractéristiques non linéaires, car on peut l'imaginer comme une combinaison d'une source de courant en parallèle avec une diode idéale [11].

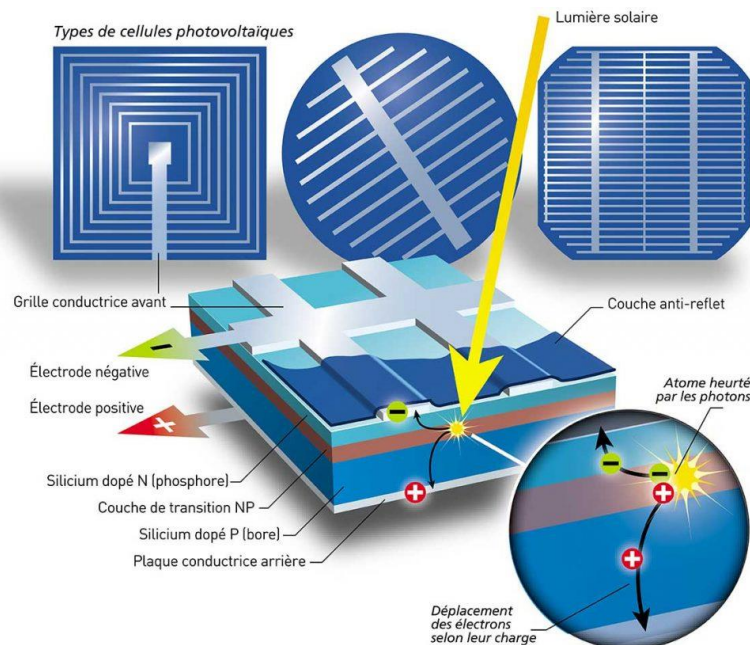


Figure I.6: cellule photovoltaïque [11]

I.3.2 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque est fondé sur les propriétés de semi-conducteurs qui, percutés par les photons, mettent en mouvement un flux d'électrons. Les photons sont des particules élémentaires qui transportent l'énergie solaire à 300 000 km/s et qu'Albert Einstein appelait dans les années 1920 les « grains de lumière ». Lorsqu'ils frappent un élément semi-conducteur comme le silicium, ils arrachent des électrons à ses atomes. Ces électrons se mettent en mouvement, de façon désordonnée, à la recherche d'autres « trous » où se repositionner [12]. Mais pour qu'il y ait un courant électrique, il faut que ces mouvements d'électrons aillent tous dans le même sens. Pour les y aider, on va associer deux types de silicium. La face exposée au soleil est « dopée » avec des atomes de phosphore qui comportent plus d'électrons que le silicium, l'autre face est dopée avec des atomes de bore qui comportent moins d'électrons. Cette double face devient une sorte de pile : le côté très chargé en électrons devient la borne négative (N), le côté avec moins d'électrons devient la borne positive (P). Entre les deux il se crée un champ électrique. Quand les photons viennent exciter les électrons, ceux-ci vont migrer vers la zone N grâce au champ électrique, tandis que les « trous » vont vers la zone P. Ils sont récupérés par des contacts électriques déposés à la surface des deux zones avant d'aller dans le circuit extérieur sous forme d'énergie électrique. Un courant continu se crée. [13]. Une couche antireflet permet d'éviter que trop de photons se perdent en étant réfléchis par la surface. Voir le schéma :

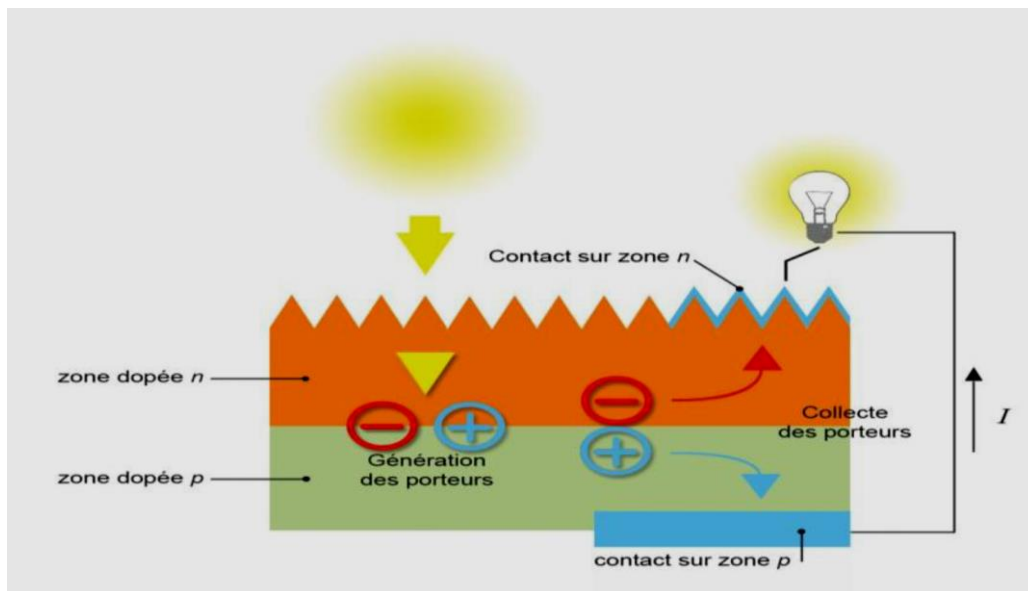


Figure I.7 : Principe de fonctionnement d'un cellule PV [12]

I.3.3 Association des cellules photovoltaïque

Dans le cas d'une association en série, les cellules délivrent le même courant mais elles peuvent fonctionner avec des tensions différentes. Si on assemble en parallèle m cellules, le courant aux bornes de l'assemblage est égal à la somme des courants produits par chacune des cellules.

I.3.3.1 Association en série

Une association des cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule.

Ce système d'association est généralement le plus utilisé pour les modules photovoltaïques du commerce. Comme la surface des cellules devient de plus en plus importante, le courant produit par une seule cellule augmente régulièrement au fur et à mesure de l'évolution technologique alors que sa tension reste toujours très faible. L'association série permet ainsi d'augmenter la tension de l'ensemble et donc d'accroître la puissance de l'ensemble.[16]

I.3.3.2 Association en parallèle

Une association parallèle des cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants [16]

I.3.3.3 Association mixte (en série et en parallèle)

Le générateur photovoltaïque est constitué d'un réseau série-parallèle de nombreux modules photovoltaïques regroupés par panneaux photovoltaïques. La caractéristique électrique globale courant/tension du GPV se déduit donc théoriquement de la combinaison des caractéristiques des cellules élémentaires supposées identiques qui le composent par deux affinités de rapport n_s parallèlement à l'axe des tensions et de rapport n_p parallèlement à l'axe des courants, n_s et n_p étant respectivement les nombres totaux de cellules en série et en parallèle.

I.3.4 Les modules photovoltaïques

Pour obtenir une tension électrique générée qui soit utilisable, on raccorde plusieurs cellules en série qui forment alors un string. Un module est composé de plusieurs strings. L'association des modules permet :

- ❖ D'obtenir une tension suffisante.
- ❖ De protéger les cellules et leurs contacts métalliques de l'ambiance extérieure (humidité...).
- ❖ De protéger mécaniquement les cellules (chocs...). [16]

I.3.5 Générateur Photovoltaïque

L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un GPV. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur. D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est l'ampérage qui augmentera [17]

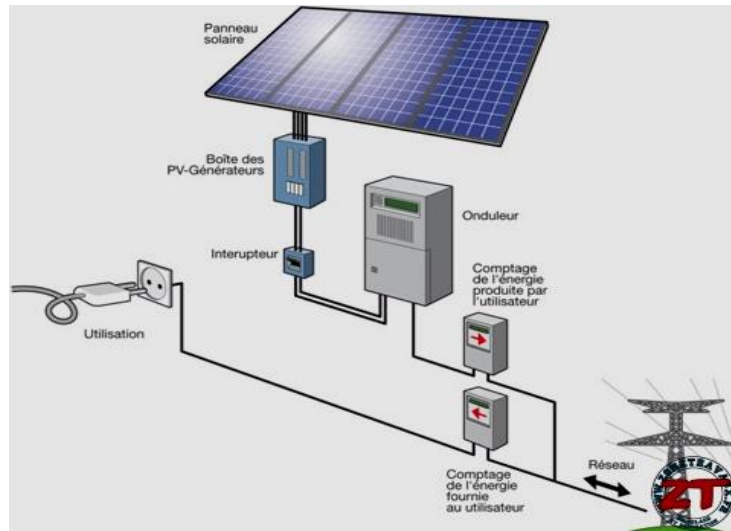


Figure I.8 : Générateur photovoltaïque. [20]

I.4 Système hybride

I.4.1 Définition

Les systèmes d'énergie hybrides (SEH) associent au moins deux sources d'énergie renouvelable aussi une ou plusieurs sources d'énergie classiques. Les sources d'énergie renouvelable, comme l'éolienne et le photovoltaïque, qui sont les plus utilisés parmi les différents types des technologies des ressources renouvelables, ne délivrent pas une puissance constante. Leur association avec des sources classiques permet d'obtenir une production électrique continue. Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées. En plus des sources d'énergie, un système hybride peut aussi incorporer des convertisseurs, des charges et des éléments de stockage [21]

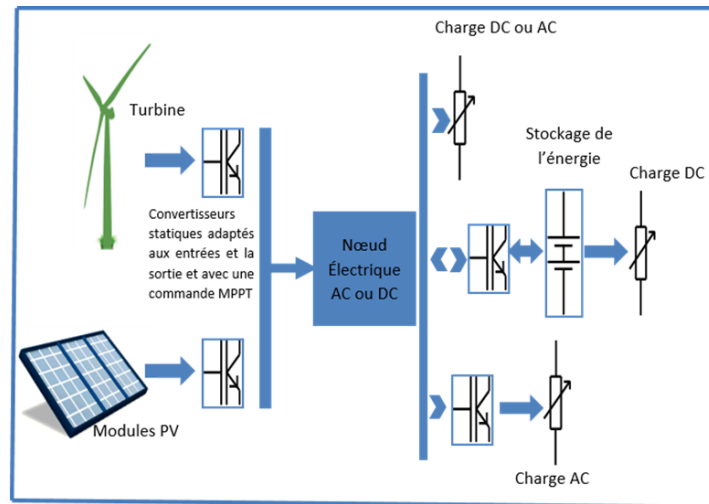


Figure I.9 : Structure d'un système hybride. [22]

I.4.2 Importance de l'hybridation

Le but d'un système d'énergie hybride est d'assurer la fourniture de l'énergie demandée par la charge et de produire le maximum d'énergie à partir des sources d'énergie renouvelable [23]. Les performances d'un SEH, le rendement et la durée de vie sont influencés en partie par sa conception (dimensionnement des composants, types de composants, architecture) et d'autre part, par le choix de la stratégie de fonctionnement. Classification des systèmes d'énergie hybrides Régime de fonctionnement Contenu du système Isolé En parallèle avec le réseau Avec ou sans source convent. Avec ou sans stockage PV, Eolien, hydraulique etc. La puissance délivrée par les SEH peut varier de quelques watts jusqu'à quelques mégawatts. Ainsi, pour les systèmes hybrides ayant une puissance en-dessous de 100 kW, la connexion mixte combinant bus à courant alternatif (CA) et bus à courant continu (CC) avec des batteries de stockage est très répandue [L. Satayanov]. Le système de stockage utilise un nombre élevé de batteries de stockage pour être capable de couvrir la charge moyenne pendant plusieurs jours. Ce type de SEH utilise de petites sources d'énergie renouvelable connectées au bus à CC. Quand il existe une production en CA, elle vient des générateurs diesel. Une autre possibilité est de convertir la puissance continue en puissance alternative à l'aide des onduleurs. Les systèmes hybrides utilisés pour des applications de très faible puissance (< 5 kW) alimentent généralement des charges à CC. Les systèmes plus grands (puissance > 100 kW) sont centrés sur le bus à CA, avec des sources d'énergie renouvelable conçues pour être connectées aux grands réseaux interconnectés. Dans les SEH, les éoliennes, les panneaux photovoltaïques et les générateurs diesel sont souvent utilisés. Ceux-ci peuvent aussi inclure d'autres sources d'énergie comme l'énergie hydraulique, géothermique, marémotrice ou l'énergie contenue dans l'hydrogène ; ces systèmes comportent aussi des convertisseurs, des charges et une forme de gestion de l'énergie. Les batteries sont utilisées pour le stockage d'énergie [24]

I.4.3 Avantages et inconvénients d'un système hybride [25]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ❖ Ne repose pas sur une seule source d'énergie. ❖ Capable de répondre à la charge évolutive, Opération simple, réduisant l'entretien et la révision. ❖ Faibles coûts associés au cycle de vie de l'application. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Comparé aux générateurs diesel, le coût en capital est élevé. ❖ Plus complexe qu'un système électrique isolé, nécessite un stockage par batterie et un conditionnement d'alimentation

Tableau I.1 : Avantages et inconvénients d'un système hybride. [25]

I.4.4 Classification des systèmes d'énergie hybride [26]

Plusieurs classifications de systèmes hybrides sont réalisées selon le critère choisi. Dans la suite sont présentées les classifications les plus répandues.

I.4.4.1 Le régime du fonctionnement

Les systèmes hybrides peuvent être divisés en deux groupes. Dans le premier groupe, on trouve les systèmes hybrides, travaillant en parallèle avec le réseau électrique, appelés aussi connectés réseau. Ces systèmes contribuent à satisfaire la charge du système électrique du pays. Les systèmes hybrides du deuxième groupe fonctionnent en régime isolé ou en mode autonome. Ils doivent répondre aux besoins des consommateurs situés dans des sites éloignés du réseau électrique : refuges de montagne, îles, villages isolés, panneaux de signalisation routière etc.

I.4.4.2 La structure du système hybride

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

- ❖ La présence ou non de sources d'énergie classique, comme un groupe électrogène, une micro turbine à gaz, etc.
- ❖ La présence ou non de dispositifs de stockage. La présence d'un stockage permet de satisfaire la demande des charges électriques pendant les périodes d'absence d'une source primaire à convertir en électricité (soleil, vent). Ces dispositifs peuvent être des batteries rechargeables, des électrolyseurs avec réservoir d'hydrogène, etc.
- ❖ La dernière classification possible est celle relative au type de sources d'énergie renouvelables utilisées. La structure du système peut contenir des modules photovoltaïques, une éolienne, un convertisseur d'énergie hydraulique ou une combinaison de ces sources. Un critère important pour la sélection des sources utilisées est le potentiel énergétique disponible qui dépend de l'endroit d'installation du système hybride.

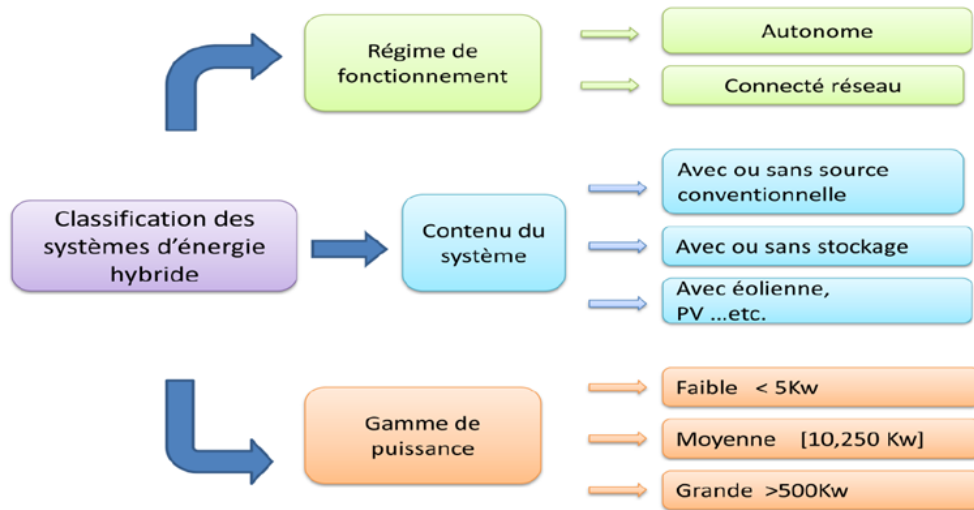


Figure I.10 : classification du système hybride. [27]

I.4.5 Configuration des systèmes hybrides

Il y a deux configurations dans Les générateurs photovoltaïques et éoliens dans un système hybride peuvent être connectés

I.4.5.1 Architecture à bus continu [1]

Dans le système hybride présenté dans la figure I.11, la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus continu. Ainsi, les systèmes de conversion d'énergie à courant alternatif (CA) fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être convertie ensuite en courant continu (CC). Les générateurs sont connectés en série avec l'onduleur pour alimenter les charges alternatives. L'onduleur doit alimenter les charges alternatives à partir du bus continu

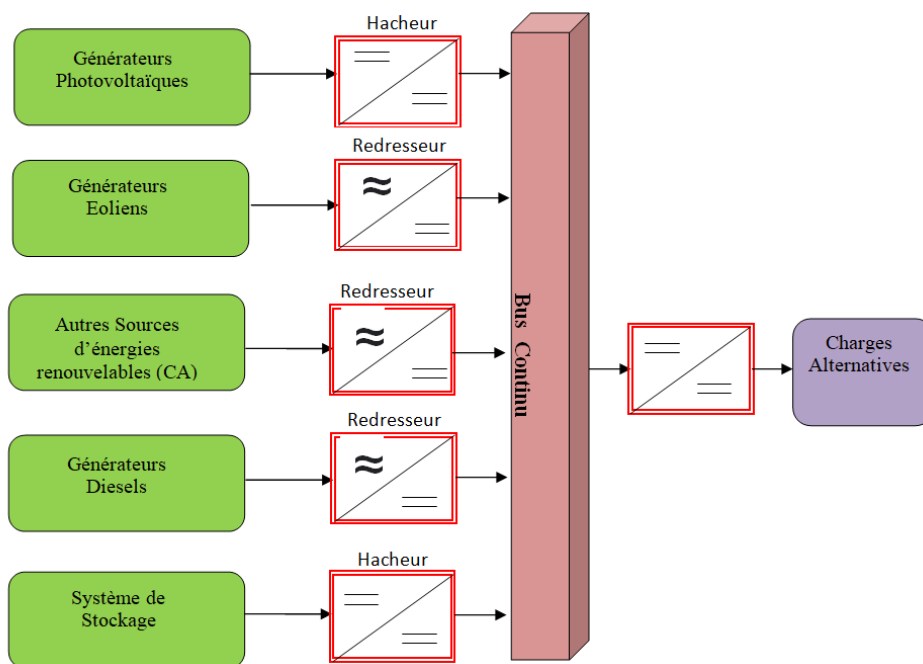


Figure I.11 : configuration du système hybride à bus continu. [28]

Avantages

- ❖ La connexion de toutes les sources sur un bus à CC simplifie le système de commande.
- ❖ Le générateur diesel peut être dimensionné de façon optimale, c'est-à-dire de sorte à fonctionner à puissance nominale pendant le processus de chargement des batteries jusqu'à un état de charge de 75-85 %.

Inconvénients

- ❖ Le rendement de l'ensemble du système est faible, parce qu'une certaine quantité d'énergie est perdue à cause des batteries et des pertes dans les convertisseurs.
- ❖ Les générateurs diesels ne peuvent pas alimenter directement la charge, l'onduleur doit donc être dimensionné pour assurer le pic de charge.

I.4.5.2 Architecture à bus alternatif [29]

Dans cette topologie, tous les composants du système hybrides sont reliés à la charge alternative, comme montrée sur la figure (I.12). Cette configuration présente des performances supérieures par rapport à la configuration antérieure, puisque chaque convertisseur peut être synchronisé avec son générateur de sorte qu'il puisse alimenter la charge indépendamment et simultanément avec les autres convertisseurs, Ceci offre une flexibilité pour que les sources d'énergie puissent satisfaire la demande de la charge. La réalisation de ce système est relativement compliquée à cause du fonctionnement parallèle, en synchronisant les tensions de sortie avec les tensions de charge

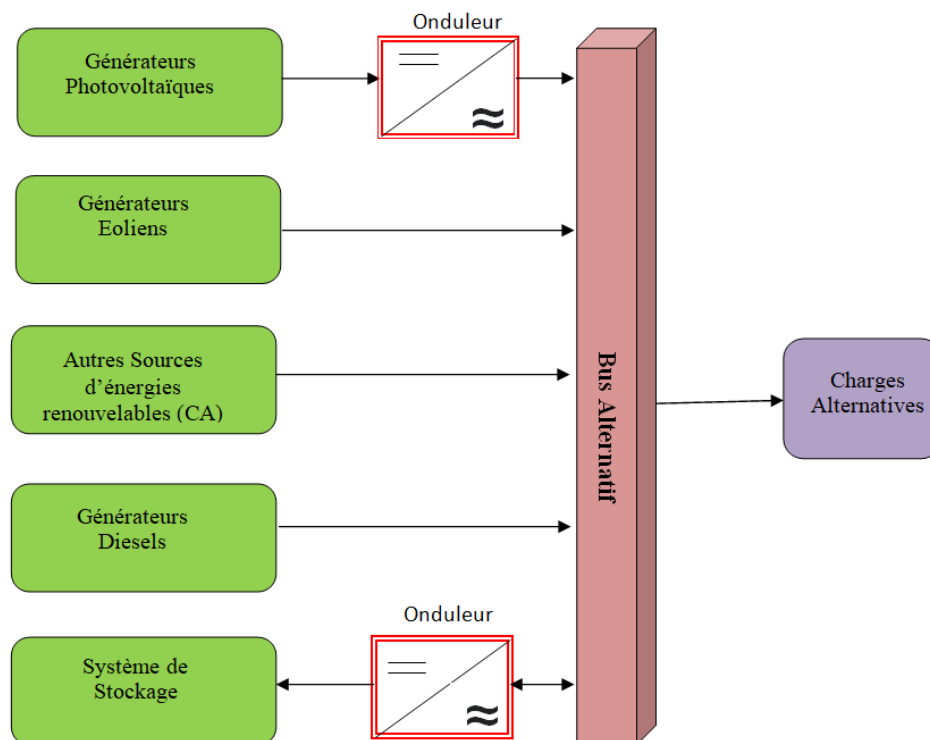


Figure I.12: configuration du système hybride à bus Alternatif. [28]

a) Avantages :

- ❖ Un rendement global plus élevé que celui en bus CC.
- ❖ Une taille réduite de l'unité de conditionnement d'énergie.
- ❖ Un niveau élevé de disponibilité énergétique.
- ❖ Un fonctionnement optimal du générateur diesel grâce à la réduction de son temps de fonctionnement et, par conséquent, de son coût de maintenance

b) Inconvénients [31]

- ❖ Cette configuration nécessite un dispositif de synchronisation entre les différentes sources.
- ❖ La synchronisation entre les différentes sources exige une tension de même fréquence, amplitude et déphasage.
- ❖ Vieillesse prématurée des batteries en raison d'une forte sollicitation

I.4.6 Critères d'optimisation du système hybride

Différents critères sont utilisés pour optimiser le système en fonction du site d'installation. Les critères les plus fréquemment utilisés sont [26] :

✚ La probabilité de perte de la charge

(lost of load probability) ou la probabilité de perte d'approvisionnement (loss of power supply probability). Ces deux critères sont univoques et rendent compte du rapport de l'énergie non satisfaite et de l'énergie totale consommée sur la période d'étude choisie. En général, le calcul de ce paramètre est réalisé en utilisant l'équation (I.1)

$$LOLP = \frac{\sum_{i=1}^m (E_{load,i} - E_{prod,i})}{\sum_{i=1}^m E_{load,i}} \dots \dots \dots (I.1)$$

ou $E_{load,i}$ est l'énergie demandée par le consommateur pour la période i , $E_{prod,i}$ est l'énergie produite, et m est le nombre de périodes pour lesquelles la recherche est réalisée [26].

✚ Le coût d'énergie produite

Diverses approches sont utilisées pour le calcul du coût : il dépend de l'énergie demandée par le consommateur, du coût d'investissement initial pour l'achat des composants du système, du coût de leur installation, du coût de maintenance et de remplacement (pour les éléments qui ont une vie d'exploitation plus courte que celle de l'élément qui définit la vie d'exploitation du système hybride) etc [26, 32]

I.4.7 Différents structures de systèmes hybrides

I.4.7.1 Systèmes hybrides avec source conventionnelle

I.4.7.1.1 Systèmes photovoltaïque/source conventionnelle

Ce type de système hybride est le plus couramment utilisé dans les climats chauds comme l'Algérie, les Maldives et l'Arabie Saoudite. Car le potentiel de l'énergie solaire est énorme. Lorsqu'ils fonctionnent en mode autonome, ces systèmes ont pour but de fournir une alimentation électrique ininterrompue aux habitations, aux bâtiments résidentiels ou administratifs ou aux villages.

D'autres systèmes alimentent des centres de recherche également connectés au réseau. Les systèmes autonomes contiennent généralement des batteries, mais aussi d'autres dispositifs de stockage. Les batteries et les panneaux photovoltaïques génèrent du courant continu. Les moteurs diesel, en revanche, peuvent entraîner des générateurs à courant continu ou à courant alternatif. Dans la plupart des cas, le consommateur a besoin de courant alternatif ; ensuite, différentes configurations de système peuvent être distinguées en fonction du type de moteur électrique connecté au moteur diesel. Ces structures ont été décrites et classifiées selon le type de flux énergétiques en plusieurs configurations chaque une à des avantages et des inconvénients [32] [33]

La première configuration est la connexion série. Dans ce cas, le générateur diesel est connecté sur le bus courant continu. La connexion peut être directe (dans le cas d'un générateur de courant continu) ou à travers un redresseur. L'installation photovoltaïque et la batterie sont aussi liées à ce bus. Le consommateur est alimenté par un onduleur. Le schéma de principe d'un système hybride avec une telle configuration est présenté sur la Figure (I.8). Dans cette configuration, le générateur diesel peut alimenter la charge à travers les convertisseurs électroniques ou charger la batterie. D'après la stratégie de gestion du système hybride, l'énergie produite par l'installation photovoltaïque peut directement alimenter la charge ou passer par la batterie [32] [33]

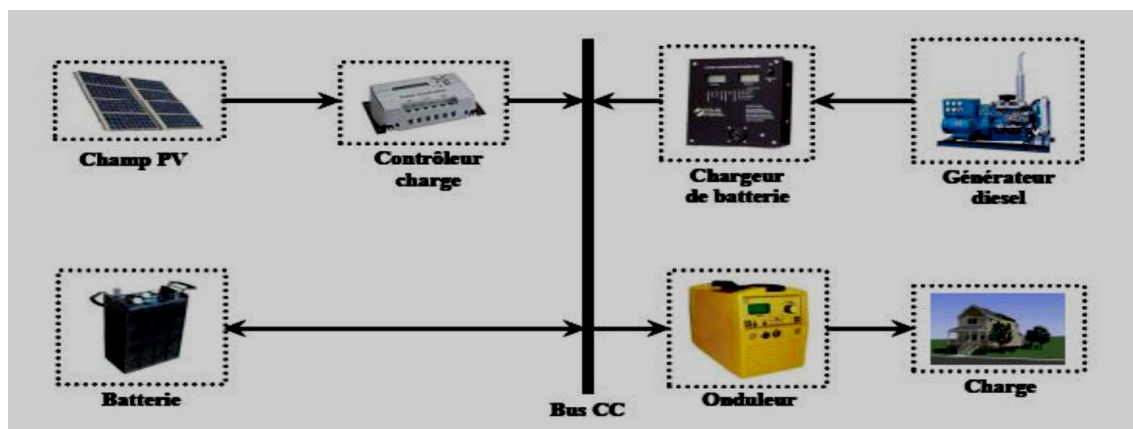


Figure I.13 : système hybride avec connexion série. [32]

Deuxième configuration connexion parallèle. Ici le générateur diesel est interconnecté sur le bus de courant alternatif. L'installation photovoltaïque et la batterie sont liées sur un autre bus – de courant continu. Les deux bus sont connectés à l'aide d'un convertisseur électronique bidirectionnel. Il peut travailler soit comme redresseur, lorsque le générateur diesel couvre la consommation électrique et participe dans le chargement de la batterie, soit comme onduleur, quand la charge (ou une part d'elle) est satisfaite par les panneaux photovoltaïques et/ou la batterie. De cette façon, la charge peut être alimentée par les deux bus simultanément. Le schéma d'un tel système hybride est représenté sur la Figure (I.9) [26] [32]

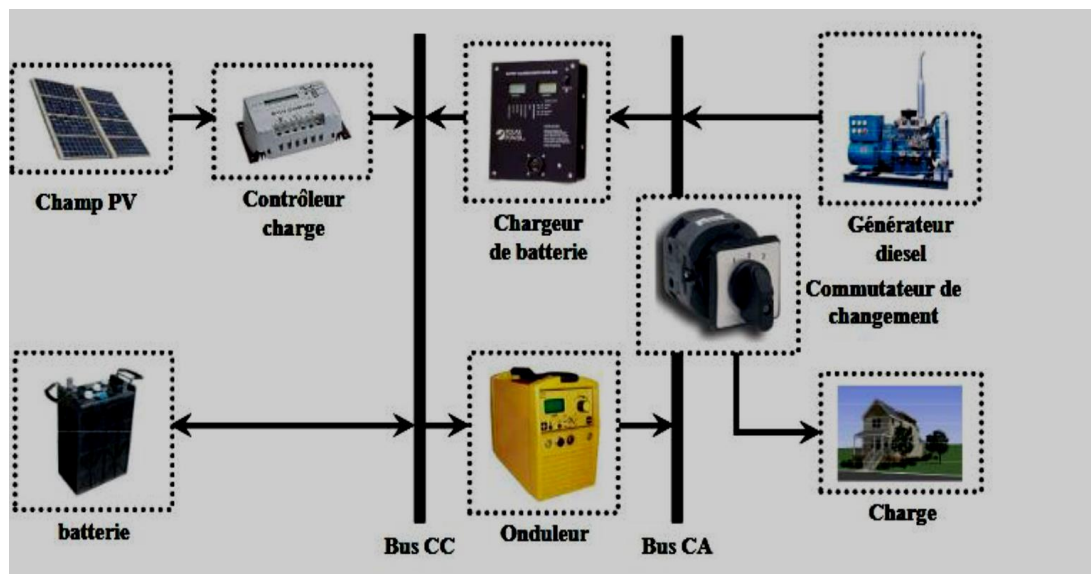


Figure I.14 :Système hybride avec connexion parallèle. [32]

I.4.7.2 Systèmes hybrides sans source conventionnelle

Ces systèmes hybrides fonctionnent surtout en mode autonome dans des sites où l'approvisionnement en carburant diesel ou le raccordement au réseau électrique est difficile, voire même impossible. Dans la suite de ce paragraphe sont présentées trois configurations de système hybride avec ou sans stockage [32]

I.4.7.2.1 Systèmes hybrides photovoltaïque/stockage

L'installation photovoltaïque doit être raccordée avec une autre source d'énergie, pour qu'il soit possible de satisfaire la charge durant la nuit ou par temps nuageux. Ces systèmes alimentent soit des maisons soit des villages. Certains travaux traitent de modélisation et d'analyse, d'autres de dimensionnement optimisé des composants du système. Le critère d'optimisation le plus souvent utilisé est la probabilité de perte d'alimentation. Le stockage est parfois idéal, un banc de batteries, un électrolyseur avec réservoir d'hydrogène ou une combinaison de deux dispositifs de stockage différents comme électrolyseur et batterie ou électrolyseur et super condensateur.

L'utilisation de super condensateurs est de conception très récente et sont utilisés pour un stockage très court avec une réactivité de quelques dixièmes de secondes, tandis que l'électrolyseur et le réservoir d'hydrogène permettent un stockage plus important en terme de quantité stockée mais plus lent.[32]

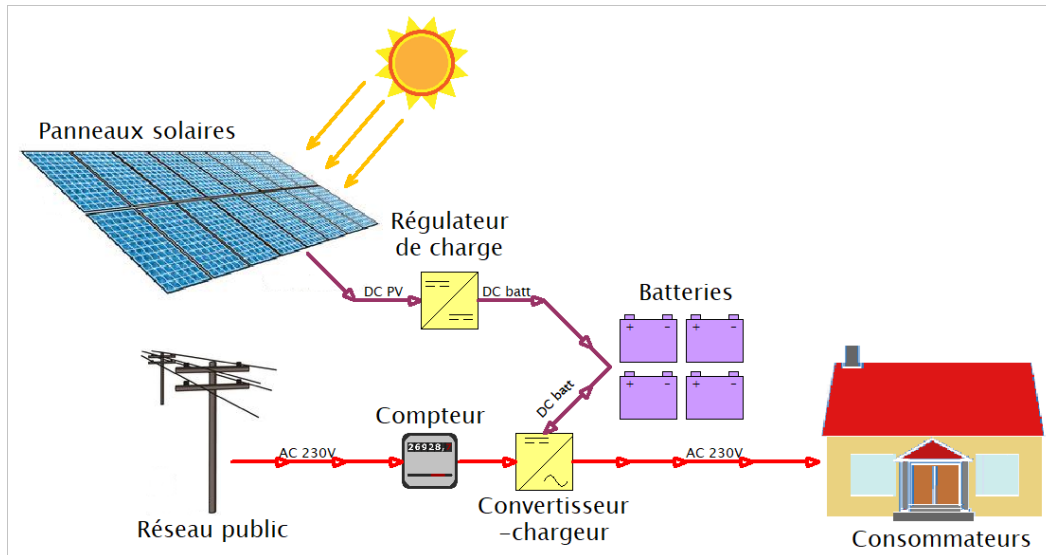


Figure I.15 : Système hybride photovoltaïque/stockage. [34]

I.5 La Pile à combustible

Une pile à combustible est un générateur électrochimique d'énergie qui permet de transformer de l'énergie chimique en énergie électrique et en énergie thermique. Un générateur électrochimique est un générateur de tension continue et rechargeable.

Parmi toutes les piles à combustible, nous avons choisi d'étudier la pile à combustible à hydrogène. Une pile à hydrogène est composée de dihydrogène et de dioxygène. Le dioxygène est une molécule composée de deux atomes d'oxygène, notée O₂. Et le dihydrogène est une molécule comportant deux atomes d'hydrogène, de formule chimique H₂ [39]

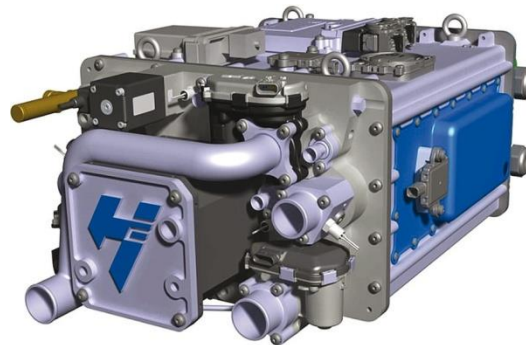


Figure I.16 : Pile à combustible [36]

I.5.1 Les différents types de piles à combustible

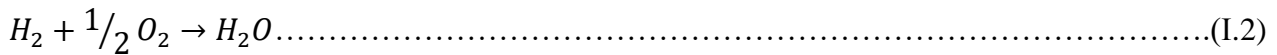
Actuellement, les PAC existantes peuvent être classées en 6 catégories suivant la température de fonctionnement et le type d'électrolyte (l'abréviation du type de piles à combustible est dérivée du nom de l'électrolyte):

	PEMFC	DMFC	PAFC	AFC	SOFC	MCFC
	Basse Température				Haute Température	
Température	70 à 100°C	70 à 90°C	150 à 220C	50 à 250°C	700 à 1050°C	600 à 800°C
Electrolyte	Membrane en Polymère solide	Membrane en Polymère solide	Acide Phosphorique liquide	Potasse (KOH) liquide	Céramique solide	Sel de Carbonate fondu liquide
Combustibles possibles	Hydrogène	Méthanol	Hydrogène, gaz naturel (reformage)	Hydrogène	Hydrogène, gaz naturel, méthanol...	Hydrogène, gaz naturel, méthanol...
Gamme de puissance	1W à 10MW	1W à plusieurs kW	200kW à 10MW	1W à 100kW	1kW à 100MW	500kW à 10MW
Rendement Electrique	30 – 45%	30 – 45%	35 – 45% 75% en cogénération	55 – 60%	50 – 55% 70% en cogénération	50 – 60%
Applications	Spatial, Transport, Stationnaire, Equipements portable	Transport, Equipements portable	Stationnaire, Cogénération, Transport	Spatial, Défense, Equipements portables	Stationnaire Cogénération	Stationnaire Cogénération
Principaux constructeurs	Ballard Nuevera Axane* Helion* (*français)	Siemens Hitachi Sanyo	Siemens Ifc (onsi) Fuji	Siemens Fuji Zevco Ifc	Siemens- Westinghouse Sulzer	IFC Hitachi Fuji

Tableau I.2: Les différents types de pile à combustible. [37]

I.5.2 Principe de fonctionnement [38]

La pile à combustible repose sur un principe fort ancien, puisque c'est en 1839 que sir William Grove construisit la première cellule électrochimique fonctionnant avec l'hydrogène comme carburant, mettant ainsi en évidence la possibilité de produire du courant électrique par conversion directe de l'énergie chimique du combustible, figure.I.12. La PAC est donc un générateur électrochimique basé sur le procédé inverse de l'électrolyse. Ce générateur génère de l'électricité en mettant en jeu sans les mélanger un combustible et un comburant à travers un électrolyte, (l'hydrogène H₂ et l'Oxygène O₂) comme couple électrochimique, les réactions d'oxydoréduction qui s'opèrent dans la pile sont particulièrement simples. La réaction globale du procédé est décrite dans l'équation chimique



La PAC se compose des cellules unitaires. Une cellule est constituée d'une anode et d'une cathode alimentées en comburant et combustible respectivement. Ces deux éléments sont séparés par un électrolyte et deux électrodes. L'électrolyte, solide ou liquide, doit permettre la circulation des ions sous une forme plus ou moins hydratée en empêchant aux électrodes de passer. Les électrodes constituent les points de connexion au circuit électrique externe. Elles sont généralement construites avec des matériaux poreux complétés par des catalyseurs. Si son principe paraît simple, sa mise en oeuvre est complexe et onéreuse.

Du fait de la faible puissance générée par une cellule unitaire, plusieurs cellules sont connectées en série pour constituer des stacks. On augmente ainsi la valeur de la tension de sortie ce qui facilite l'utilisation de l'énergie électrique. Cependant, cela exige la présence d'un élément additionnel entre les cellules, la plaque bipolaire. Celle-ci, conductrice électriquement, ne doit en aucun cas autoriser le contact entre l'hydrogène et l'oxygène qui passent à son travers. L'énergie électrique générée par une PAC est caractérisée par une relation non linéaire entre la tension et le courant, qui ont respectivement une petite et une grande valeur. Cette réponse électrique dépend du courant de la pile, de la température et de la concentration des espèces chimiques principalement.

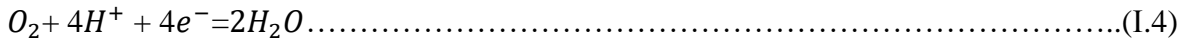
Les combustibles les plus utilisés sont l'hydrogène, le gaz naturel, le monoxyde de carbone et le méthanol. Le choix du combustible dépend énormément du type de PAC et de l'application. Le comburant est généralement l'oxygène de l'air, figure.I.12. Si la PAC est alimentée en hydrogène et en oxygène purs, les seuls sous-produits sont de la chaleur et de l'eau sans aucune émission polluante. Du fait de la qualité de chaleur produite, son exploitation est envisageable : chauffage, cogénération (exploitation simultanée de la chaleur et de l'électricité générée par la PAC) ou cycle combiné (combinaison d'une PAC avec une turbine, généralement). Ceci augmente donc le rendement global et élargit le domaine d'applications.

A la différence des piles et des batteries classiques, la PAC a besoin de renouveler et d'évacuer continûment les réactifs et les sous-produits pour fonctionner. Donc, la production d'énergie n'implique pas une dégradation de la structure de la PAC. En fait Une pile à combustible est un convertisseur électrochimique fonctionnant en mode ouvert, c'est-à-dire qu'il est alimenté en continu en réactif.

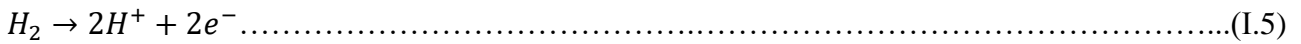
La figure.I.17 décrit le schéma du principe de fonctionnement de la PAC. Il s'agit d'une combustion électrochimique contrôlée de dihydrogène et de dioxygène, avec production simultanée d'électricité, d'eau et de chaleur, selon la réaction chimique de fonctionnement de la pile



Pour mettre en œuvre cette réaction, on dispose de deux électrodes l'anode et la cathode séparées par un électrolyte(milieu bloquant le passage des électrons mais laissant circuler les ions). Cette réaction est déclenchée en utilisant un catalyseur, en général du platine. A la cathode, pôle positif de la pile, le comburant mis en jeu est toujours le dioxygène du couple $O_2 (g)/ H_2O$ selon lademi-équation électronique :



A l'anode, pôle négatif de la pile, le combustible utilisé est le dihydrogène H_2 du couple H^+ / H_2 , selon la demiéquation électronique :



Le dihydrogène et le dioxygène utiliser peuvent être fabriqués par électrolyse de l'eau. On peut aussi utiliser le dioxygène de l'air. Les piles à combustibles utilisant du dihydrogène pur comme combustible ne rejettent que de la vapeur d'eau, et disposent d'un rendement élevé car elles assurent en une seule étape le passage de l'énergie chimique à l'énergie électrique (monocycle).

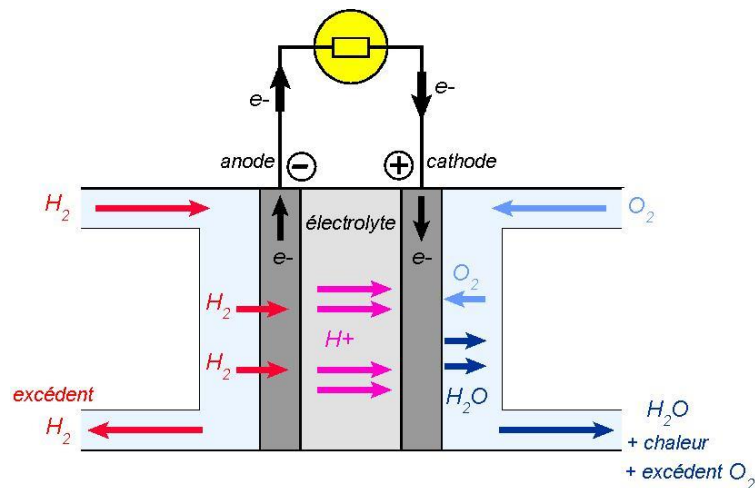


Figure I.17 : Schéma du principe de fonctionnement d'une pile à combustible [35]

I.5.3 Eléments de base d'une cellule élémentaire de PAC [41]

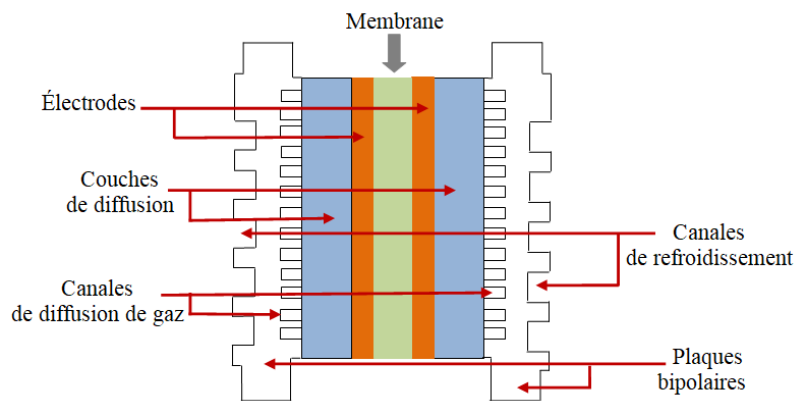


Figure I.18 : Eléments de base pile à combustible [37]

La cellule de base d'une pile à combustible est constituée d'un empilement de deux électrodes poreuses séparées par un électrolyte solide. De chaque côté de l'électrode, on trouve deux couches de diffusion et deux plaques bipolaires.

a) Plaques bipolaires

La tâche principale des plaques bipolaires est d'assurer l'arrivée des gaz à la surface de la couche de diffusion. Elles sont à base de graphite [Lar00, Han04] et contiennent des canaux qui permettent le passage des gaz le long de la surface. Sur le dos de chaque plaque, on trouve généralement des canaux conçus pour transporter le liquide de refroidissement du système (figure I.13).

b) Couches de diffusion

Les couches de diffusion assurent une bonne distribution des gaz sur toute la surface de réaction, qui est la surface active de l'électrode. Elles doivent avoir une bonne résistance mécanique à la température et à la présence d'eau.

c) Assemblage Membrane - Electrodes

Les électrodes sont à base d'un matériau carboné sur lequel sont déposés des grains de platine jouant le rôle de catalyseur. Leur épaisseur est de l'ordre de quelques dizaines de micromètres. Le processus de réalisation conduit à les déposer sur la membrane où elles s'imbriquent fortement. Une fois ce processus réalisé, l'ensemble constitue ce que l'on appelle l'Assemblage Membrane – Electrodes (en Anglais MEA, Membrane Electrode Assembly).

- ❖ Les travaux actuels portent sur :
- ❖ La réduction de la quantité de platine qui est un matériau onéreux ;
- ❖ La réduction de l'épaisseur de la membrane qui en s'opposant à la circulation des ions intervient pour une part non négligeable dans la résistance interne du système ;
- ❖ La recherche de matériaux de membrane pouvant fonctionner à des températures supérieures aux 40 – 90 degrés actuels

I.6 Systèmes de stockage

Pour les systèmes autonomes utilisant une source renouvelable comme seul apport d'énergie, la présence du stockage est indispensable pour pallier l'intermittence de la production d'électricité. Il existe de nombreux moyens de stocker de l'électricité, qui passent quasiment tous par sa conversion en une autre forme d'énergie plus aisée à confiner, telle l'énergie chimique, l'énergie mécanique, l'air comprimé ou le stockage à base d'hydrogène par exemple. Seuls le

stockage électromagnétique (supraconducteurs) et le stockage électrostatique (supera condensateurs) stockent l'électricité sous forme de charges électriques [42].

Le tableau I.3 regroupe les principales caractéristiques des différentes technologies de stockage de l'énergie électrique.

Technologie De stockage	Inductances Supra-conductrices	Super condensateurs	Volants d'inertie	Air comprimé en bouteille	Hydrogène (via PAC)	Batteries électrochimiques
Forme d'énergie	magnétique	électrostatique	Mécanique	Mécanique	Carburant	Chimique
Densité énergétique	1 à 5 Wh/kg	5 à 10 Wh/kg	1 à 5 Wh/kg	8 Wh/kg à 200 bars	300 à 600 Wh/kg	20 à 120 Wh/kg
Capacité	Qlqs kWh	Qlqs kWh	Qlqs kWh	Qlqs kWh	Qlqs kWh à qlqsMWh	Qlqs kWh
Rendement	>90%	80% a >90%	80% a >90%	30 a 50%	30 a 50%	70 a 80%
Constante de temps	Qlqs scds à 1min	Qlqs scds à 1min	Qlqs mins A 1 hrs	1 hr à qlqs Jours	1 hr à qlqs jours	10 min(Cd) à 10 hrs (Pb)

Tableau I.3 : Caractéristiques des différentes technologies de stockage [43,44]

I.6.1 Les Batteries

La batterie est souvent intégrée aux générateur photovoltaïque, elle permet le stockage de l'électricité pour les systèmes isolés, et elle restitue la nuit ou les journées nuageuses cette électricité accumulée durant la journée.

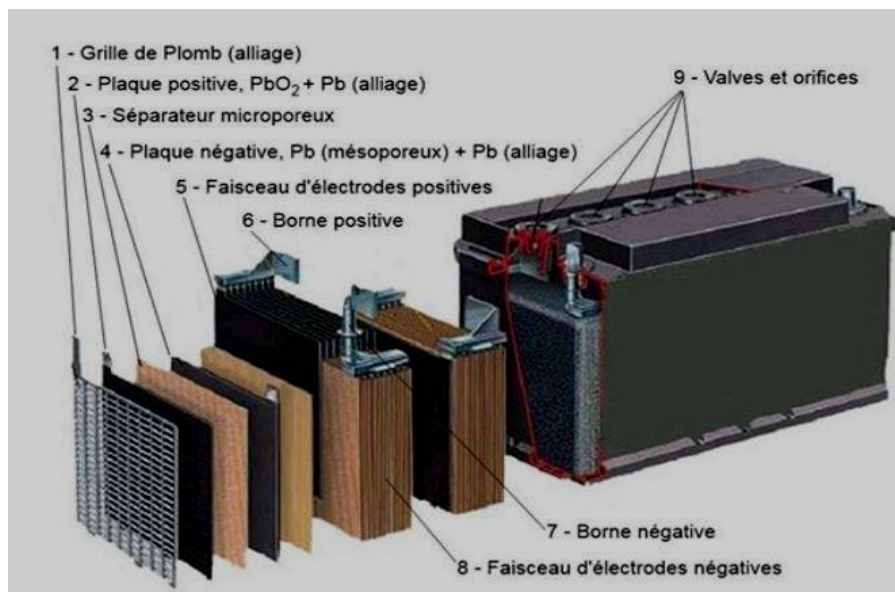


Figure I.19 : Composants d'une batterie [15,16].

I.6.1.1 Principe de fonctionnement d'une batterie

Les accumulateurs sont constitués de deux électrodes, l'une positive (la cathode) et l'autre négative (l'anode) séparée par un électrolyte (figure I.14). Aux deux interfaces interviennent des réactions électrochimiques d'oxydation ou de réduction des matières actives des électrodes.

- ❖ À l'anode, (électrode négative en décharge) s'opère une réaction d'oxydation selon la Relation suivante : $M1 \rightarrow M1n^+ + ne^-$, de potentiel redox $E1$, $M1$ étant l'espèce active de l'anode.
- ❖ Les électrons libérés transitent dans le circuit extérieur pour atteindre finalement la cathode (électrode positive en décharge) où s'opère une réaction de réduction selon : $M2n^+ + 2e^- \rightarrow M2$, de potentiel redox $E2$, $M2$ étant l'espèce active de la cathode.
- ❖ L'électrolyte assure le transport des espèces ioniques mises en jeu dans la réaction globale d'oxydoréduction, qui s'écrit : $M_1 + M_{2n}^+ \rightarrow M_{1n}^+ + M_2$.
- ❖ Le transport engendre une force électromotrice $E = E2 - E1$

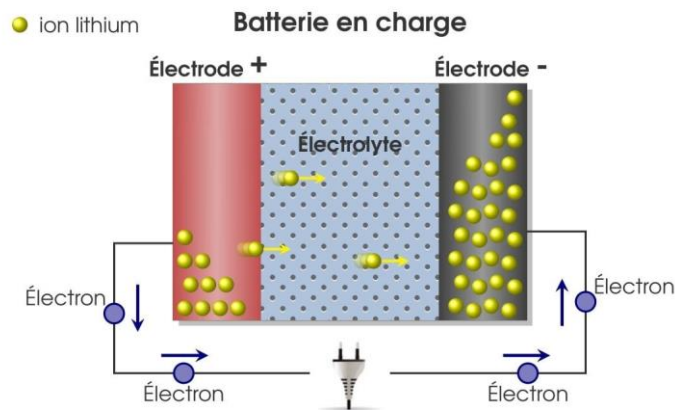


Figure I.20 : Principe d'un accumulateur électrochimique. [47]

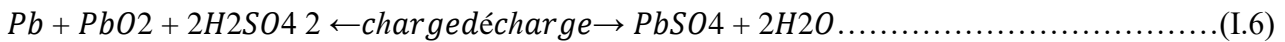
I.6.1.2 Types des batteries

Il existe plusieurs types de stockage actuellement. Mais le seul stockage d'énergie électrique possible dans le système PV est le stockage électrochimique. Les deux principaux types d'accumulateurs utilisés sont :

a) Batteries plomb-acide

Une batterie plomb-acide consiste en une électrode négative en plomb spongieux ou poreux. Le plomb est poreux pour faciliter la formation et la dissolution du plomb. L'électrode positive est constituée d'oxyde de plomb. Les deux électrodes sont immergées dans une solution électrolytique d'acide sulfurique et d'eau. Dans le cas où les électrodes entrent en contact l'une avec l'autre par le mouvement physique de la batterie ou par des changements d'épaisseur des électrodes, une membrane électriquement isolante mais chimiquement perméable sépare les deux électrodes. Cette membrane empêche également les courts-circuits électriques à travers l'électrolyte. Les batteries au

plomb stockent de l'énergie par la réaction chimique réversible illustrée ci-dessous. La réaction chimique globale est:



Les batteries au plomb sont le type de batterie le plus couramment utilisé dans les systèmes photovoltaïques. Bien que les batteries au plomb aient une faible densité d'énergie, une efficacité modérée et des exigences de maintenance élevées, elles ont également une longue durée de vie et des coûts faibles par rapport aux autres types de batteries. L'un des avantages singuliers des batteries au plomb-acide est qu'elles sont la forme de batterie la plus singuliers des batteries au plomb-acide est qu'elles sont la forme de batterie la plus couramment utilisée pour la plupart des applications de batteries rechargeables (par exemple, pour démarrer des moteurs de voiture) et qu'elles disposent donc d'une base technologique bien établie et mature [48]

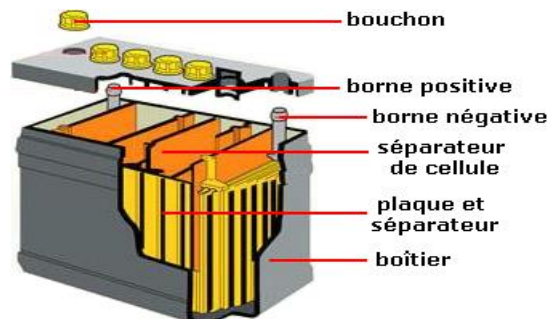
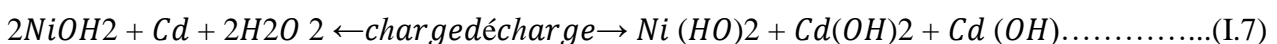


Figure I.21: Batteries plomb-acide [49]

b) Batteries Nickel-Cadmium

Cette batterie utilise de l'oxyde de nickel dans son électrode positive (cathode), un composé de cadmium dans son électrode négative (anode) et une solution d'hydroxyde de potassium comme électrolyte. La batterie au nickel-cadmium est rechargeable, elle peut donc fonctionner à plusieurs reprises. Une batterie au nickel-cadmium convertit l'énergie chimique en énergie électrique lors de la décharge et reconvertit l'énergie électrique en énergie chimique lors de la recharge. Dans une batterie *NiCd* complètement déchargée, la cathode contient de l'hydroxyde de nickel [$Ni(OH)_2$] et de l'hydroxyde de cadmium [$Cd(OH)_2$] dans l'anode. Lorsque la batterie est chargée, la composition chimique de la cathode est transformée et l'hydroxyde de nickel se transforme en Oxhydroxyde de nickel [$NiOOH$]. Dans l'anode, l'hydroxyde de cadmium est transformé en cadmium. Lorsque la batterie est déchargée, le processus est inversé, comme indiqué dans la formule suivante [50]:



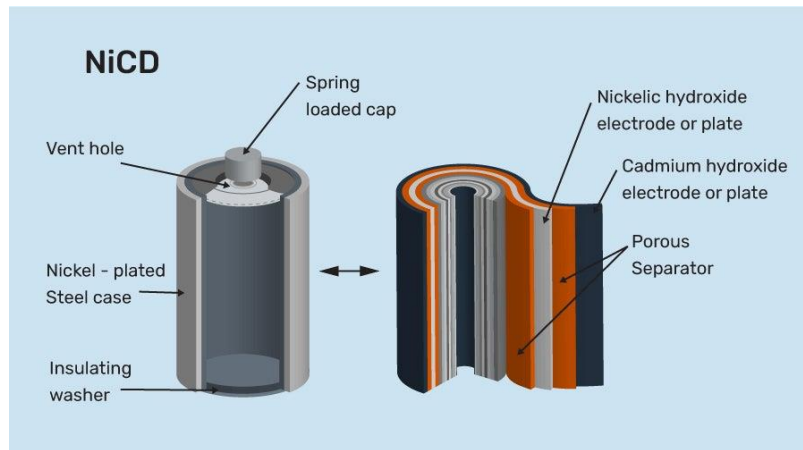


Figure I.22 Batteries Nickel-Cadmium [51]

I.6.2 Les super condensateurs

Les super condensateurs (Figure I.17) stockent l'énergie sous forme électrostatique. Ils sont des systèmes de stockage d'énergie de faible densité d'énergie mais d'une densité de puissance importante. Par conséquent, ils sont utilisés dans les phases transitoires pour fournir les pics de puissance demandés, afin de réduire les sollicitations en courant, de diminuer la taille et d'augmenter la durée de vie de la source principale d'énergie (batteries ou pile à combustible) [52].

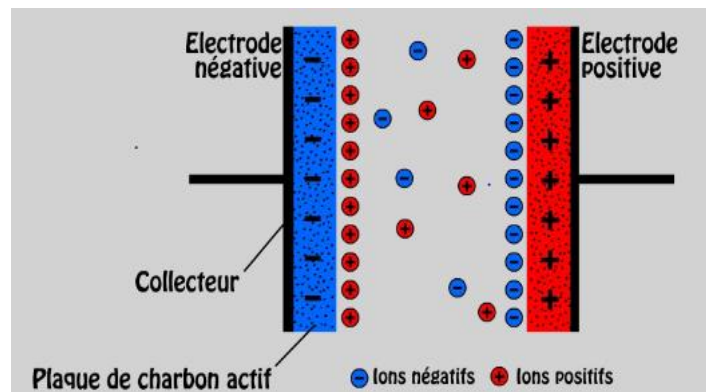


Figure I.23 : schéma de super-condensateur [53]

I.6.2.1 Structure et fonctionnement des super condensateurs

La structure élémentaire d'un super condensateur est constituée par des collecteurs de courant en aluminium, des électrodes généralement en charbon actif imprégné dans un zéro électrolyte organique ou aqueux. Un séparateur est intercalé entre les deux électrodes pour les isoler (Fig. I.17). L'assemblage de l'ensemble est réalisé comme pour les condensateurs classiques [54]. Un super condensateur peuvent être schématisés par deux capacités représentatives des Charges stockées connectées par le biais d'une résistance associée à l'électrolyte

Principe de fonctionnement des super condensateurs : Le principe général de fonctionnement des super condensateurs repose sur la formation d'une double couche électrochimique à l'interface d'un électrolyte et d'une électrode polarisable de grande surface spécifique. L'application d'une

différence de potentiel aux bornes du dispositif complet entraîne le stockage électrostatique de charges aux deux interfaces électrode-électrolyte. Le principe de fonctionnement peut être décomposé en fonction des 4 états différents du composant (déchargé, en charge, chargé, en décharge) : [55]

a) Etat en charge [55]

Lors de l'application d'une différence de potentiel aux bornes du super condensateur, la distribution des charges aux deux interfaces va être modifiée. L'une d'entre elles passant par son potentiel de charge nulle tandis que l'autre voit augmenter l'accumulation de charges. Il y a donc une augmentation du potentiel.

Si la charge est poursuivie jusqu'à la valeur maximale U_{max} du potentiel applicable, les deux doubles couches électrochimiques se comportent comme deux condensateurs et voient donc leurs charges augmentées selon une loi du type $Q = CU$. A l'état chargé, la capacité totale du dispositif résulte des capacités (C_1 et C_2) des deux interfaces en série et est donc donnée par :

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \dots \dots \dots (I.8)$$

b) Etat déchargé [55]

A l'état déchargé et sans aucune alimentation, une accumulation de charge se crée spontanément à l'interface électrode/électrolyte aussi bien du côté de l'électrode (q^{el}) que du côté de l'électrolyte (q^{ion}). q^{el} et q^{ion} sont respectivement les charges de nature électronique et ionique par unité de surface. La condition d'électro neutralité impose $q^{el} = -q^{ion}$. Un potentiel, dit potentiel d'abandon apparaît alors à chaque interface, le signe et l'amplitude de ce potentiel est spécifique de chaque couple électrode/électrolyte. Cette accumulation de charges correspond à la double couche électrochimique (son épaisseur est de quelques nanomètres).

I.6.2.2 Les avantages et les inconvénients

a) Les avantages [56] [57]

- ❖ Cycle de vie charge / décharge important comparé aux batteries chimiques sans dégradation des caractéristiques.
- ❖ Densité de puissance élevée (2000-4000W/kg) correspondant à 10 fois celles des batteries de lithium-ion de puissance élevée et 100 fois celles des condensateurs classiques.
- ❖ Capacité de capture d'énergie (freinage rétroactif) à cadence élevée : des batteries sont souvent endommagées par les charges rapides.
- ❖ Capacité élevée (énergie élevée qui peut être déchargée rapidement).
- ❖ ESR (résistance série) très basse.
- ❖ Courant de fuite très faible (peut maintenir une charge sur une longue durée).

- ❖ Energie stockée supérieure à celle d'un condensateur conventionnel.
- ❖ Charge très rapide.

b) Les inconvénients [58]

- ❖ Basse énergie spécifique (10 Wh/kg).
- ❖ Plage de tension limitée.
- ❖ Technologie moins mûre que celle des batteries.
- ❖ Prix plus élevé par rapport aux batteries d'acides de plomb qui sont assez peu coûteuses aujourd'hui et économiques
- ❖ Energie spécifique plus faible que celle des batteries. - Le coût.

I.7 La différence entre la batterie et super-condensateur

	Super condensateur	batterie
Temps de charge t	1s<t<30s	1 heure<t<5 heures
Temps de décharge	1s<t<30s	0.3 heure < 3 heures
Rendement : charge/décharge	entre 85% et 98%	entre 70% et 85%
Densité de puissance (W/kg)	10^4	$< 10^3$
Densité d'énergie (Wh/kg)	entre 1 et 10	entre 10 et 100
Durée de vie nombre de cycles	10^6	10^3

Tableau I.4 Performances de stockage. [59]

D'après les données du tableau ci-dessus, il est clair que le super-condensateur est un élément potentiel pour le stockage de l'énergie embarquée comme source pour la demande de fortes puissances pendant quelques secondes. Le super-condensateur a déjà pris place dans la voiture pour la récupération d'énergie et pas seulement dans les véhicules électriques. En effet, les super-condensateurs sont particulièrement efficaces pour répondre à ce besoin. Capable de se charger et se décharger très rapidement, le super-condensateur se présente comme une batterie ultra-rapide et fiable. [60]

I.8 Les convertisseurs statiques

Les convertisseurs devenus des composantes essentielles dans de nombreuses applications industrielles et militaires au cours des dernières décennies. Grâce à leurs rendements de plus en plus élevés leurs faibles encombrements ainsi que leurs poids et coûts réduits, ils ont remplacé les alimentations classiques linéaires, même pour de faibles niveaux de puissance.[61]

I.8.1 Types de convertisseurs statiques [62]

On distingue deux types de convertisseurs:

a) Les convertisseurs continu alternatif (onduleurs)

Les convertisseurs DC/AC sont utilisés pour une conversion de la tension continue fournie par le GPV en une tension alternative et parfois ils peuvent avoir, en plus, la fonction d'adaptation de la charge pour une utilisation rationnelle de la puissance fournie par le GPV.

b) les convertisseurs continu – continu (appelés hacheurs)

Les hacheurs sont des convertisseurs de type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé. Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle qu'on a de bons rendements pour les hacheurs.

Les convertisseurs DC/DC sont utilisés pour une exploitation rationnelle (maximale) de la puissance fournie par le générateur PV et parfois pour l'adaptation de la tension continue du générateur à la charge.

I.8.2 Les familles de hacheurs

On distingue trois familles de hacheurs : [63]

- ❖ hacheur série ou abaisseur (ou Buck),
- ❖ Hacheur parallèle ou élévateur(ou Boost),
- ❖ Hacheur série-parallèle ou abaisseur-élévateur (Buck–Boost)

I.8.2.1 Convertisseur Buck

Le hacheur série est un convertisseur direct DC–DC. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant. L'interrupteur **S** peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage). [63]

C'est un convertisseur qui donne en sortie une tension plus petite que celle de l'entrée. La structure du convertisseur abaisseur est présentée sur la figure (I.18).

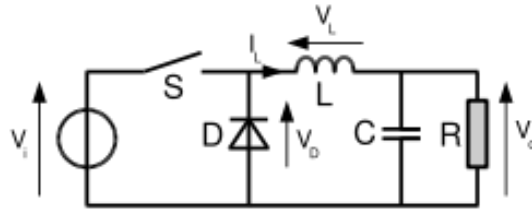


Figure I.24: Schéma du convertisseur Buck [61]

I.8.2.2 Convertisseur boost

Hacheur élévateur, hacheur survolteur, hacheur parallèle, hacheur de type Boost. C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu et la charge sortie est de type tension continu l'interrupteur peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage)[64]

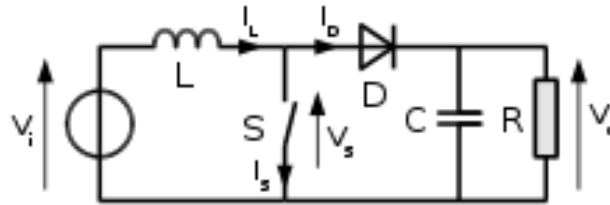


Figure I.25 : schéma équivalente du convertisseur boost.[61]

I.8.2.3 Le convertisseur Buck-Boost

Hacheur inverseur, dévolteur- survolteur, hacheur de type buck-boost. Le hacheur inverseur est un convertisseur indirect DC-DC à stockage inductif. La source d'entrée est de type tension continue (filtrage capacitif en parallèle avec une source de tension) et la charge de sortie continue de type source de tension (condensateur en parallèle avec la charge résistive).

Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des deux convertisseurs précédents, il est utilisé comme un transformateur idéal de n'importe quelle tension d'entrée pour n'importe quelle tension de sortie désirée [65]

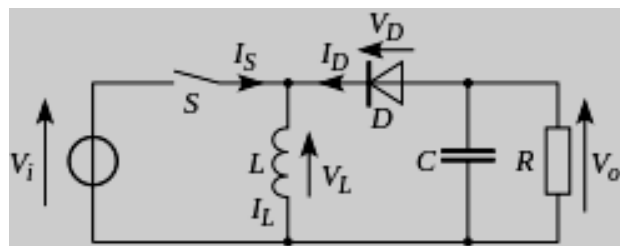


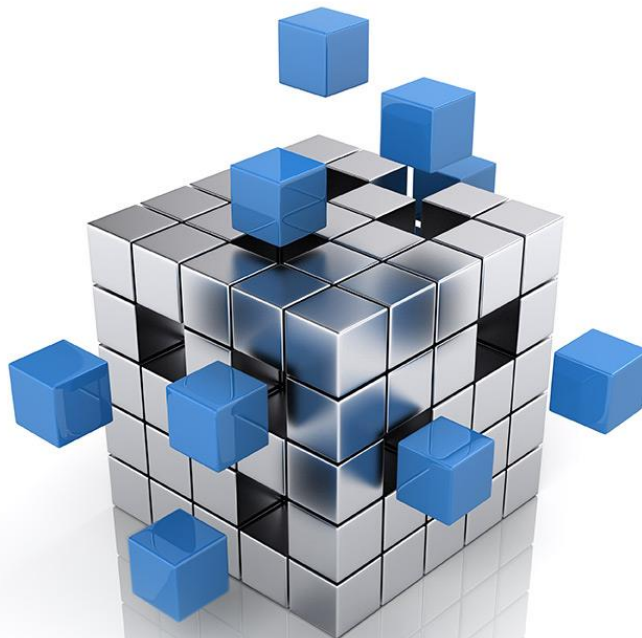
Figure I.26 : Schéma équivalent du convertisseur buck-boost [61]

I.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un état de l'art sur les énergies renouvelables en particulier l'énergie photovoltaïque et son exploitation ensuite nous avons décrit les moyens de stockage (batteries & super condensateurs). Nous avons aussi présenté une brève description des différents composants de base du système hybride.

Chapitre II

MODELISATIONS DES ELEMENTS DU SYSTEME HYBRIDE



II.1 Introduction :

Pour déterminer une stratégie de gestion adéquate, il faut connaître le comportement du système en fonction des données d'entrée. Cette connaissance passe par la modélisation et la simulation. Ce chapitre nous allons détailler les différentes parties du système PV au voisinage du point de puissance maximale MPPT, aussi le stockage (batterie, super-condensateurs). Dans ce qui suit, nous présentons les modèles mathématiques bien détaillés de chacun de ces différents éléments du système.

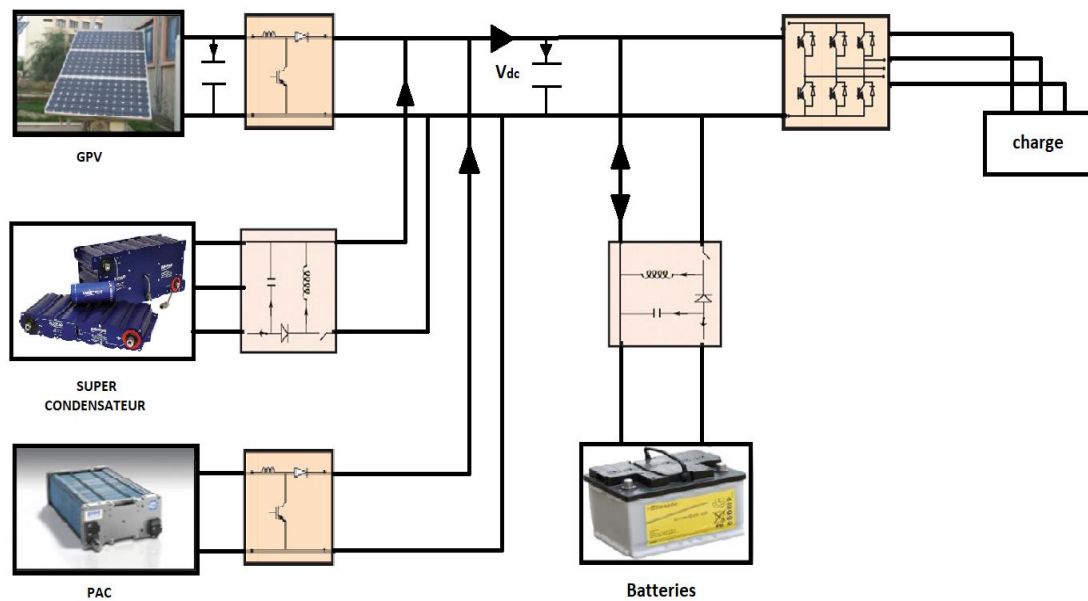


Figure II.1: Structure du système à énergie hybride (photovoltaïque, pile à combustible) avec stockage.

II.2 Modélisation de la chaîne de production photovoltaïque

Un système photovoltaïque est constitué de quatre blocs comme le montre la figure (II.2). Le premier bloc représente la source d'énergie (panneau photovoltaïque), le second bloc est un convertisseur statique DC-DC, le troisième bloc représente la charge et le quatrième bloc représente le système de commande.

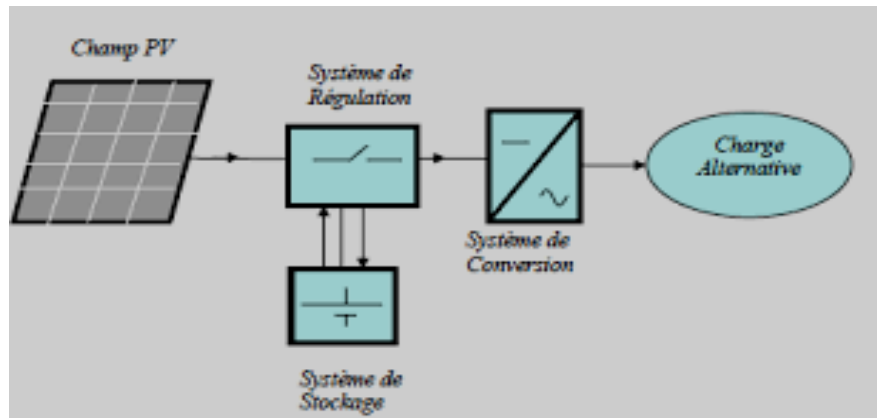


Figure II.2 : Schéma synoptique du système photovoltaïque. [3]

II.2.1 Module photovoltaïque utilisé

Le modèle le plus couramment utilisé pour une cellule PV est le circuit équivalent à une diode comme illustré à la figure (II.3) [66], Ce circuit est constitué d'une source de courant photoélectrique I_{ph} , d'une diode, d'une résistance R_{sh} exprimant le courant de fuite en parallèle et d'une résistance R_s en série décrivant une résistance interne au passage du courant [67] [68], Comme la résistance de shunt R_{sh} est grande, elle peut normalement être négligée. Le modèle à cinq paramètres présenté à la figure II.3 (a) peut donc être simplifié dans celui illustré à la figure II.3 (b).

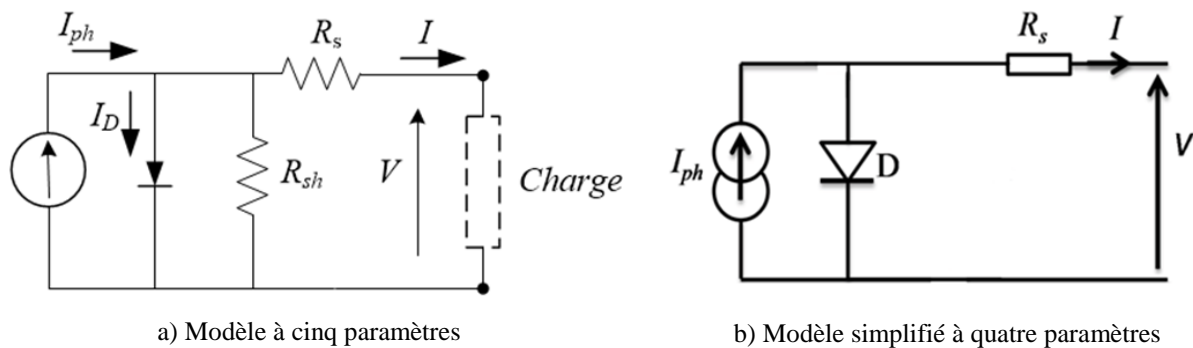


Figure II.3 : Modèle électrique du circuit électrique équivalent d'un PV. [66]

II.2.2 Modélisation d'un générateur photovoltaïque

Un générateur photovoltaïque ou module est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires connectés en série et en parallèle. Un groupe de panneaux PV est constitué de N_s cellules montées en série et N_p cellules en parallèle.

Le modèle à une diode est actuellement le plus utilisé en raison de sa simplicité. Il permet d'exprimer l'intensité d'un module PV en fonction de la tension à ses bornes et des conditions climatiques (éclairage et température ambiante). [69]

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \dots \dots \dots (II.1)$$

Le courant qui passe dans la résistance R_{sh} est donné par :

$$I_{sh} = \frac{V + I.R_s}{R_{sh}} \dots\dots\dots (II.2)$$

Le courant de diode est donné par :

$$I_D = I_0 \left[\exp\left(\frac{V + I.R_s}{\alpha}\right) - 1 \right] \dots\dots\dots (II.3)$$

En remplaçant l'équation (II.2) (qui est une formule expliquée par la thermodynamique statistique dans (II.1), le courant de sortie s'écrit :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + I.R_s}{\alpha}\right) - 1 \right] - \frac{V + I.R_s}{R_{sh}} \dots\dots\dots (II.4)$$

La résistance shunt R_{sh} est inversement proportionnelle au courant de fuite, l'efficacité du PV est insensible à une variation de la résistance shunt [70, 71]. D'autre part, une faible variation de la résistance série R_s va affecter de manière significative la puissance de sortie du PV. Alors, le modèle se simplifie et l'équation (II.3) ci-dessus peut être réécrite comme suit:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + I.R_s}{\alpha}\right) - 1 \right] \dots\dots\dots (II.5)$$

Avec :

- ❖ I_{ph} (A): Courant photovoltaïque et dépend de l'irradiation solaire;
- ❖ I_0 (A): Courant de saturation inverse de la diode ;
- ❖ I (A): Courant de sortie de la cellule photovoltaïque, c'est le courant de charge ;
- ❖ V (V): Tension aux bornes de la cellule photovoltaïque ;
- ❖ R_s (Ω): Résistance série et elle a une petite valeur ;
- ❖ R_{sh} (Ω): Résistance parallèle et elle a une petite valeur ;
- ❖ α (V): Facteur de saturation thermique et dépend de la température de jonction.

Le courant I_{ph} dépend énormément de l'irradiation solaire et de la température de la cellule et peut être donné par [70] :

$$I_{ph} = I_{ph(T1)} (1 + -K_0(T - T1)) \dots\dots\dots (II.6)$$

Avec :

$$I_{ph(T1)} = G I_{cc(T1)} / G_{nom} \dots\dots\dots (II.7)$$

$$K_0 = \frac{I_{cc(T2)} - I_{cc(T1)}}{I_{cc(T1)}(T2 - T1)} \dots\dots\dots (II.8)$$

Où :

- ❖ G est l'irradiation en W/m^2 ;

- ❖ G_{nom} est l'irradiation nominale de la cellule photovoltaïque en W/m^2 ;
- ❖ $I_{cc}(T1)$ est le courant de court-circuit à la première température de référence (A) ;
- ❖ $I_{cc}(T2)$ est le courant de court-circuit à la deuxième température de référence (A) ;
- ❖ $T1$ et $T2$ des températures de référence (K) ;
- ❖ T est la température de la cellule solaire (K).

Le courant de saturation de la diode est donné par :

$$I_0 = I_{0(T1)} \left(\frac{T}{T1} \right)^{\frac{3}{n}} \left[\exp \left(\frac{-V_g}{\alpha} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T1} \right) \right) \right] \dots\dots\dots (II.9)$$

Avec :

$$I_{0(T1)} = I_{cc(T1)} \left[\exp \left(\frac{-V_{ocT1}}{\alpha} + 1 \right) \right] \dots\dots\dots (II.10)$$

D'où :

- ❖ n est le facteur de qualité de la diode (sans unité) ;
- ❖ V_g est la tension de la bande interdite «Band gap» en V;
- ❖ V_{ocT1} est la tension en circuit ouvert à la température $T1$ de la cellule PV.

En fin, la résistance série R_s peut être déterminée comme suit [72 , 73]:

$$R_s = \frac{-dV}{dI_{Voc}} - \frac{1}{X_V} \dots\dots\dots (II.11)$$

Avec:

$$X_V = I_{0(T1)} \frac{1}{\alpha} \left[\exp \left(\frac{V_{oc(T1)}}{\alpha} \right) \right] \dots\dots\dots (II.12)$$

Le terme $\frac{dV}{dI_{Voc}}$ représente la dérivée de la tension par rapport au courant lorsqu'on atteint la tension en circuit ouvert.

II.2.3 Caractéristiques de module photovoltaïque

La courbe caractéristique d'une cellule photovoltaïque représente la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension aux bornes de la cellule photovoltaïque depuis le court-circuit (tension nulle correspondant au courant maximum produit) jusqu'au circuit ouvert (courant nul pour une tension maximale aux bornes de la cellule). Figure (II.4)

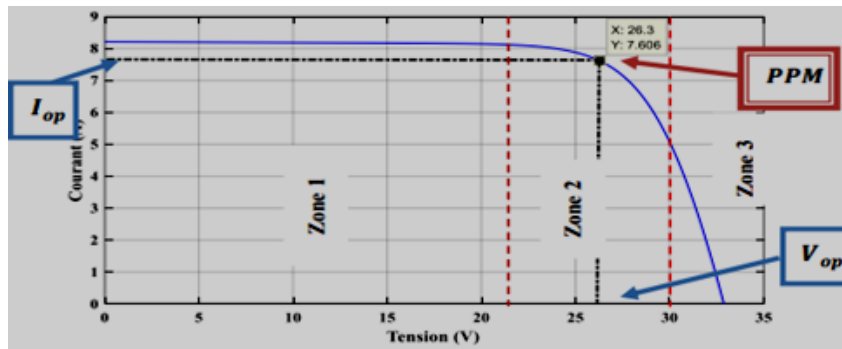


Figure II.4 :Caractéristique courant-tension d'un module photovoltaïque. [42]

On peut résumer le fonctionnement du générateur PV en se basant toujours sur la caractéristique $I(V)$ par trois zones de fonctionnement comme suit [73, 74] :

- ❖ **Zone 1** : le GPV est un générateur de courant (le courant est constant).
- ❖ **Zone 2** : c'est la zone de travail du GPV (puissance maximale).
- ❖ **Zone 3** : le GPV est un générateur de tension (la tension est presque constante).

Nous pouvons aussi représenter la caractéristique puissance-tension qui nous permet de bien voir l'emplacement de la puissance maximale du panneau solaire. Cette dernière ne pourra être qu'un seul point de fonctionnement.

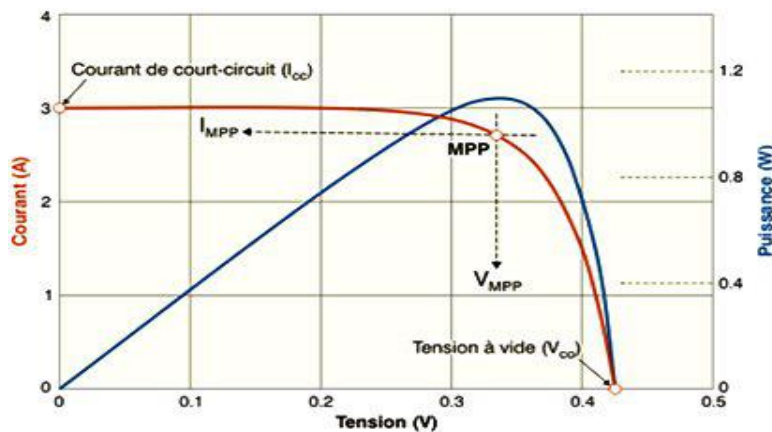


Figure II.5 : Caractéristique puissance-tension d'un module photovoltaïque. [42]

A partir de la figure (II.5), on peut déterminer les paramètres les plus usuels et qui sont :

II.2.3.1 Courant de court-circuit (I_{cc})

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule PV est nulle. Dans le cas où R_s est nulle et R_{sh} est infinie, ce courant sera confondu avec le photo-courant I_{ph} . Si non, ce courant est obtenu en annulant la tension V dans l'équation II.3, on obtient:

$$I_{cc} = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{I_{cc} \cdot R_s}{\alpha}\right) - 1 \right] - \frac{I_{cc} \cdot R_s}{R_{sh}} \dots\dots\dots (II.13)$$

Pour la plupart des photopiles (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme

$I_0 \left[\exp\left(\frac{I_{cc} \cdot R_s}{\alpha}\right) - 1 \right]$ devant I_{ph} . L'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

$$I_{cc} = \frac{I_{ph}}{1 + \frac{R_s}{R_{sh}}} \dots\dots\dots (II.14)$$

II.2.3.2 Tension de circuit ouvert (V_{oc})

C'est la tension pour laquelle le courant débité par le générateur PV est nul (la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur PV). Son expression est déduite en annulant le courant I dans l'équation II.3 :

$$0 = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V_{oc}}{\alpha}\right) - 1 \right] - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \dots\dots\dots (II.15)$$

II.2.3.3 Puissance optimale et facteur de forme

La puissance utile maximale $P_M = V_M I_M$, s'obtient en optimisant le produit courant tension, soit :

$$\frac{I_M}{V_M} = - \left(\frac{dI}{dV} \right)_M \dots\dots\dots (II.16)$$

Le facteur de forme FF, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage, il est donné par:

$$FF = \frac{I_M V_M}{I_{cc} V_{oc}} \dots\dots\dots (II.17)$$

Ce facteur montre la déviation de la courbe I(V) par rapport au rectangle de longueur V_{oc} et largeur I_{sc} qui correspond à la photopile idéale.

II.2.4 constitution d'un générateur photovoltaïque

Dans les conditions standardisées de test (une insolation de $1000W/m^2$ et une température de $25^\circ C$) la puissance maximale pour une cellule Si (silicium) de 100 cm^2 (10 sur 10) tourne aux alentours de 1,25 Watt. Cette cellule constitue donc un générateur de très faible puissance, insuffisant pour les applications électriques courantes. Les modules sont donc réalisés par association, en série et/ou en parallèle, de cellules élémentaires [75]

II.2.4.1 Association des cellules photovoltaïques

❖ **Association en série / en parallèle**

Association en série	Association en parallèle
<p>Pour une association en série de N_s cellules PV identiques, ces dernières sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante est obtenue par addition des tensions à courant donné.</p> <p>On aura donc :</p> $\begin{cases} I_{Scc} = I_{cc} \\ V_{Soc} = N_s V_{oc} \end{cases}$	<p>Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont obtenues en appliquant la règle de dualité par rapport au groupement en série. Pour l'association de N_p cellules en parallèle, ces dernières sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante est obtenue par addition des courants à tension donnée. On écrit :</p> $\begin{cases} V_{Poc} = V_{oc} \\ I_{Pcc} = N_p I_{cc} \end{cases}$

Tableau II.1 : Comparaison entre l'association série/ parallèle des cellules photovoltaïques. [76]

❖ **Association mixte**

L'équation relative à une association mixte formée par la mise en série de N_s cellules et de N_p en parallèle est la suivante [76]:

$$I = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left[\exp \left(\frac{N_s V + \frac{N_s}{N_p} I R_s}{\alpha} \right) - 1 \right] - \frac{N_s V + \frac{N_s}{N_p} I R_s}{\frac{N_s}{N_p} R_{sh}} \dots \dots \dots (II.18)$$

Par déduction, la puissance extractible est donnée par :

$$P_{pv} = N_s N_p I V \dots \dots \dots (II.19)$$

La caractéristique électrique d'une association mixte est analogue à celle d'une cellule élémentaire,

II.2.4.2 Influence des paramètres météorologiques sur les caractéristiques du module PV

❖ **Influence de l'irradiation :**

La figure (II.6) représente les caractéristiques (P-V) et (I-V) pour différentes valeurs de l'éclairement, à une température constante :

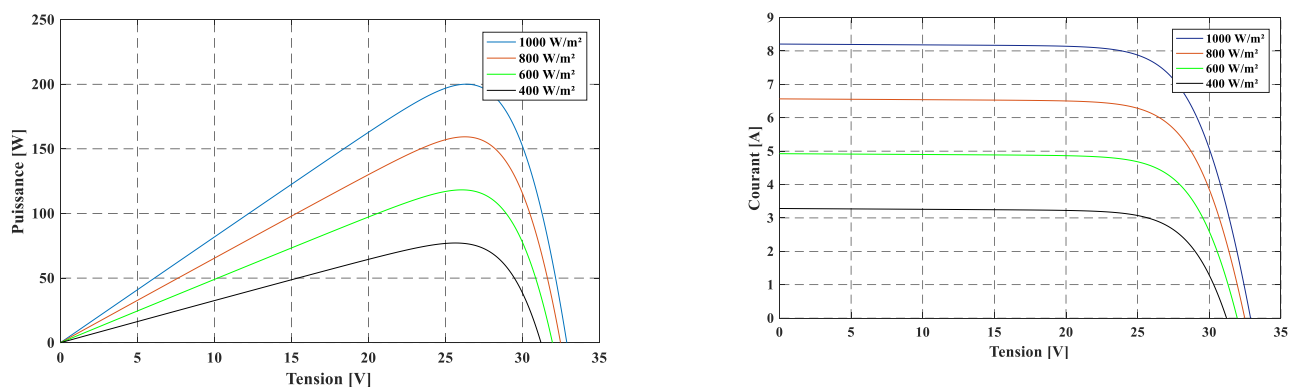


Figure II.6 : Caractéristique (I-V) et (P-V) pour différents éclairement

On remarque que la variation de l'éclairement influe visiblement sur le courant de court-circuit et peu sur la tension de circuit ouvert par conséquent la variation de PPM est proportionnelle à l'éclairement.

❖ **Influence de la température T_c**

Les caractéristiques électriques d'une cellule PV dépendent de la température de jonction au niveau de la surface exposée. La figure (II.7) donne l'allure générale des caractéristiques électriques d'un générateur photovoltaïque pour différentes valeurs de températures et un éclairement constant. On remarque, que lorsque la température augmente, le courant photo-généré augmente très légèrement alors que la tension de circuit ouvert diminue considérablement.

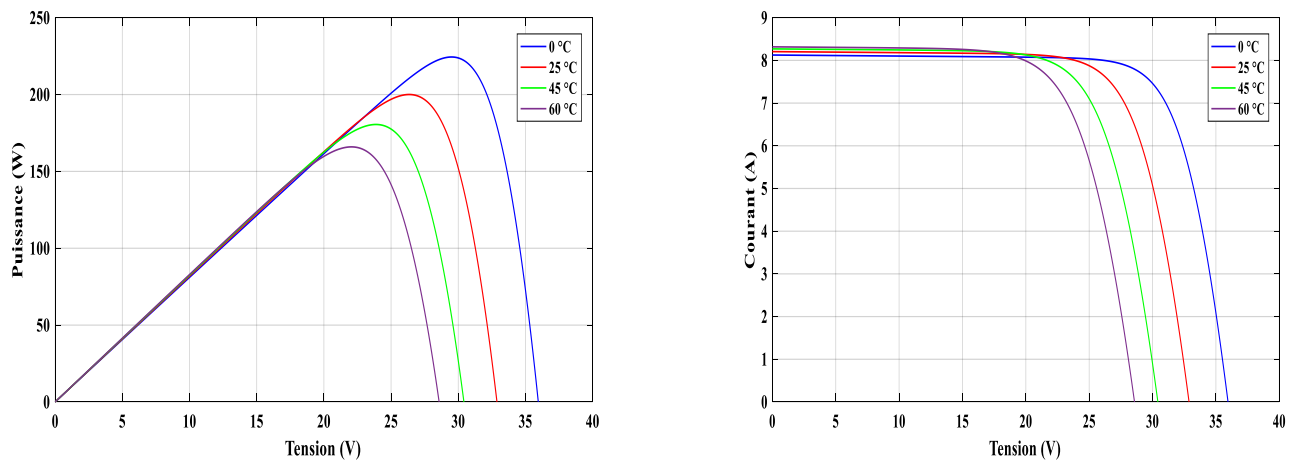


Figure II.7 : Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ pour différentes températures

❖ **Influence de la résistance série R_S**

Nous avons tracé les caractéristiques (P-V) et (I-V), avec la variation de la résistance série, et nous avons obtenu la figure (II.8) :

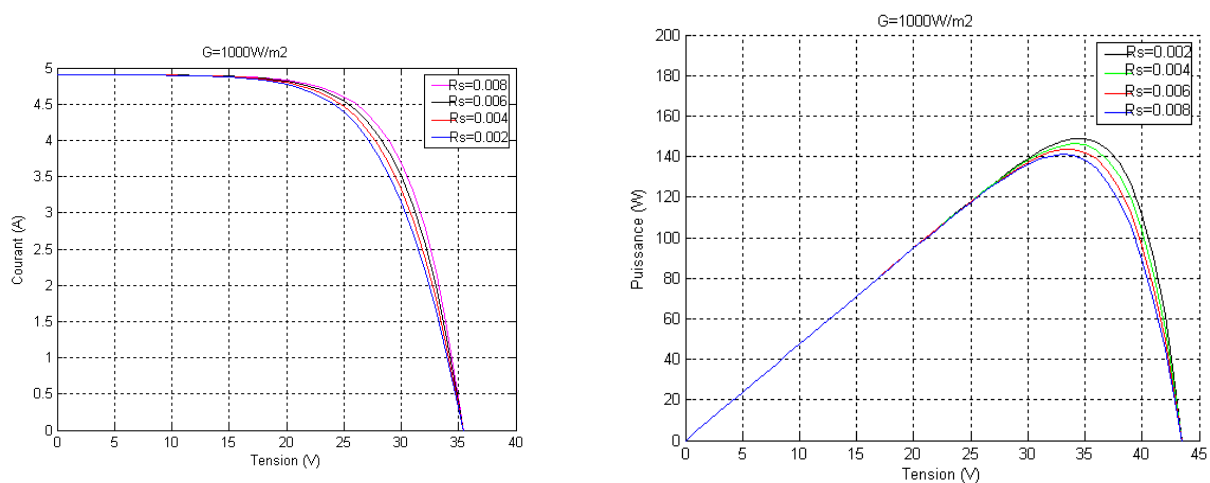


Figure II.8: Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ d'un module photovoltaïque pour différentes valeurs de la résistance série

D'après ces résultats, nous remarquons que la résistance série provoque des pertes localisés dans le panneau photovoltaïque, ce qui engendre la délocalisation de point de puissance maximale.

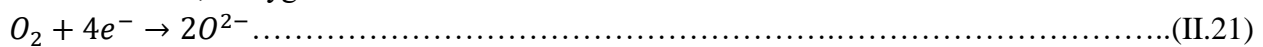
II.3 Modélisation de la pile à combustible

II.3.1 Principe de fonctionnement [78]

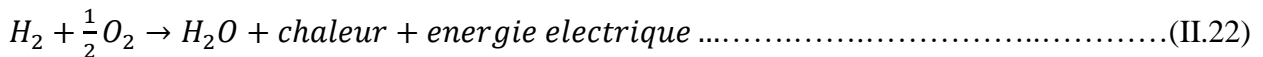
Pour les piles à combustible avec un électrolyte conducteur de protons (PEMFC), l'hydrogène est oxydé à l'anode et les protons sont transportés à travers la membrane vers la cathode selon la réaction:



Et à la cathode, l'oxygène est réduit selon la réaction:



Les électrons circulent par le circuit externe durant ces réactions. Une fois arrivés à la cathode, les protons se recombinaient avec les ions d'oxygène pour former de l'eau selon la réaction:



II.3.2 Représentation électriques de la pile

De nombreux travaux proposent un modèle statique décrivant la courbe de polarisation de la PAC] :

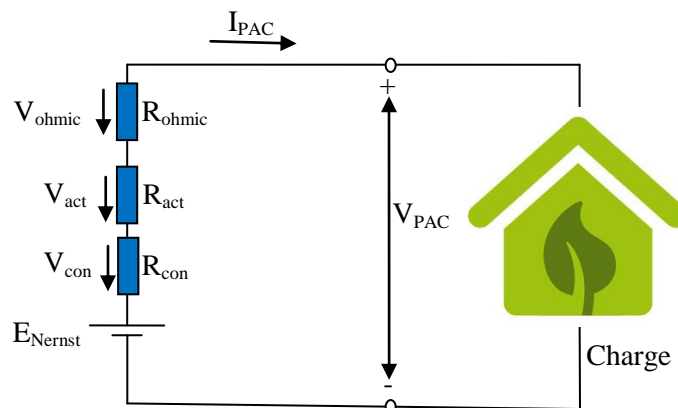


Figure II.9: Représentation électrique d'une pile à combustible [42]

De la figure (II.9) on peut écrire [1-3] :

$$V_{PAC} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{con} \dots\dots\dots (II.23)$$

- ❖ V_{PAC} : Tension réelle d'une pile unitaire (Volt)
- ❖ E_{Nernst} : Potentiel thermodynamique (idéal) de chaque pile et représente la tension réversible;
- ❖ V_{act} : Pertes d'activation (volt) ;
- ❖ V_{ohm} : Pertes ohmiques (volt) ;
- ❖ V_{conc} : Pertes de concentration (volt) ;

Pour calculer la tension V_s de n piles unitaires reliées en série formant un stack : $V_s = n * V_{PAC}$

Avec : n : le nombre de piles

E_{nerst} dépend des températures et des pressions partielles des réactifs et des produits à l'intérieur de la pile, E_0 est le potentiel de cellule réversible standard (V), N_0 est le nombre de cellules dans la pile, R est la constante universel des gaz ($8,3145 \text{ J} \times \text{mol}^{-1} \times \text{K}^{-1}$), T est la température de la cheminée (K), F est la constante de Faraday ($96485 \text{ A} \times \text{C} \times \text{mol}^{-1}$), $P_{H_2}, P_{O_2}, P_{H_2O}$ sont les pressions partielles d'hydrogène, d'oxygène et d'eau (atm) respectivement [1, 3, 11, 12, 14, 18] :

$$\begin{cases} E_{nerst} = N_0 [E_0 + \frac{RT}{2F} \log(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}})] \\ V_{ohmic} = R_m I \end{cases} \dots\dots\dots(\text{II.24})$$

Où $K_{O_2}, K_{H_2}, K_{H_2O}$ sont les constantes molaires de la vanne pour l'oxygène, l'hydrogène et l'eau en ($\text{Kmol} \times \text{s}^{-1} \times \text{atm}^{-1}$) respectivement.

$$\begin{cases} P_{O_2} = \frac{1/k_{O_2}}{1 + \tau_{O_2} s} (q_{O_2}^{in} - 2k_r I) \\ P_{H_2} = \frac{1/K_{H_2}}{1 + \tau_{H_2} s} (q_{H_2}^{in} - 2k_r I) \\ P_{H_2O} = \frac{1/K_{H_2O}}{1 + \tau_{H_2O} s} (2K_r I_{fc}) \\ q_{H_2}^{in} = \frac{1}{1 + T_f s} [\frac{2k_r}{U_{opt}} I_{fc}] \\ q_{O_2}^{in} = \frac{1}{r_{HO}} q_{H_2}^{in} \end{cases} \dots\dots\dots(\text{II.25})$$

$q_{H_2}^{in}, q_{O_2}^{in}$ et sont le débit d'entrée d'hydrogène et d'oxygène (kMol / s), I est le courant de cheminée (A),

$K_r = \frac{N}{4F}$ est la constante de modélisation, avec N le nombre de piles à combustible à bobines en série dans la pile. $\tau_{H_2}, \tau_{O_2}, \tau_{H_2O}$ sont les constantes de temps pour l'hydrogène, l'oxygène et l'eau en (sec),

U_{opt} est l'utilisation optimale du carburant, T_f la constante de temps du carburant (s), r_{HO} le rapport hydrogène / oxygène [1,3, 4], $V_{act}, V_{ohmic}, V_{con}$ correspondent respectivement aux pertes d'activation, de polarisations ohmiques et de polarisations de concentration.

$$V_{act} = [\xi_1 + \xi_2 T + \xi_{3T} \times \ln(C_{O_2}) + \xi_4 T \times \ln(I)] \dots\dots\dots(\text{II.26})$$

Où $\xi_i (i=1,2,3,4)$ sont définis comme étant les coefficients paramétriques basés sur les phénomènes cinétiques, thermodynamiques et électrochimiques. C_{O_2} est la concentration

d'oxygène dissous dans une interface de film d'eau dans le catalyseur de la cathode en (mol / m³).

Il s'exprime comme suit [3, 14]:

$$C_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{5.08 \times 10^6 e^{\frac{498}{T}}} \dots\dots\dots(\text{II.27})$$

La perte de polarisation ohmique est donnée par:

$$V_{ohmic} = IR_m \dots\dots\dots(\text{II.28})$$

R_m :est la résistance ohmique

La polarisation de concentration est exprimée par:

$$V_{con} = -B \times \ln\left(1 - \frac{I}{I_{lim}}\right) \dots\dots\dots(\text{II.29})$$

avec: I_{lim} la densité de courant où le carburant est utilisé au même taux que le taux d'entrée maximal (A / cm²).

Pour dimensionner la pile à combustible, il convient de calculer la quantité d'énergie électrique extraite de la PAC.. Par conséquent, il est nécessaire d'estimer la quantité d'énergie générée par la PAC (pour 1 kg d'hydrogène) pouvant être obtenue comme suit [1 , 3, 4]:

$$E_g^{FC} = H_2^{used} \zeta_{fc} \frac{H_2 heatingvalue}{H_2 density} \dots\dots\dots(\text{II.30})$$

Où H_2^{used} représente la quantité d'hydrogène entrant dans la PAC en kg, ζ_{fc} est l'efficacité de la PAC, H_2 est la valeur calorifique et est égale à 3,4 kWh / m³ en condition standard (la densité du H₂ est de 0,09 kg / m³).

II.3.3 Caractéristique tension/densité de courant :

La figure (II.10) illustre la caractéristique courant-tension d'une PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell). Pour une température = 25°C, par contre la figure II.13 présente la caractéristique courant- tension pour différentes température. La tension évolue en fonction de la densité de courant et on peut distinguer trois zones [3, 14, 18] :

- ✓ La première zone à faible **densité** de courant représente les polarisations d'activation anode et cathode qui est le phénomène le plus important pour les faibles densités de courant.

- ✓ La deuxième zone à moyenne densité de courant caractérise le comportement ohmique de la cellule, c'est la zone la plus utilisée en fonctionnement car elle est linéaire et elle est valable sur une forte plage de variation de la densité de courant.
- ✓ La troisième zone à haute densité de courant liée à la limitation par diffusion et noyage n'est pas exprimée. Ces phénomènes déterminent l'évolution de la pression des différentes espèces dans les canaux de la pile à combustible et ils sont dues au transport du gaz. Cette dernière zone ne doit pas être utilisée en fonctionnement car le noyage détériore très fortement les performances de la pile.

Le choix de la densité de courant nominale détermine les performances des piles PEM

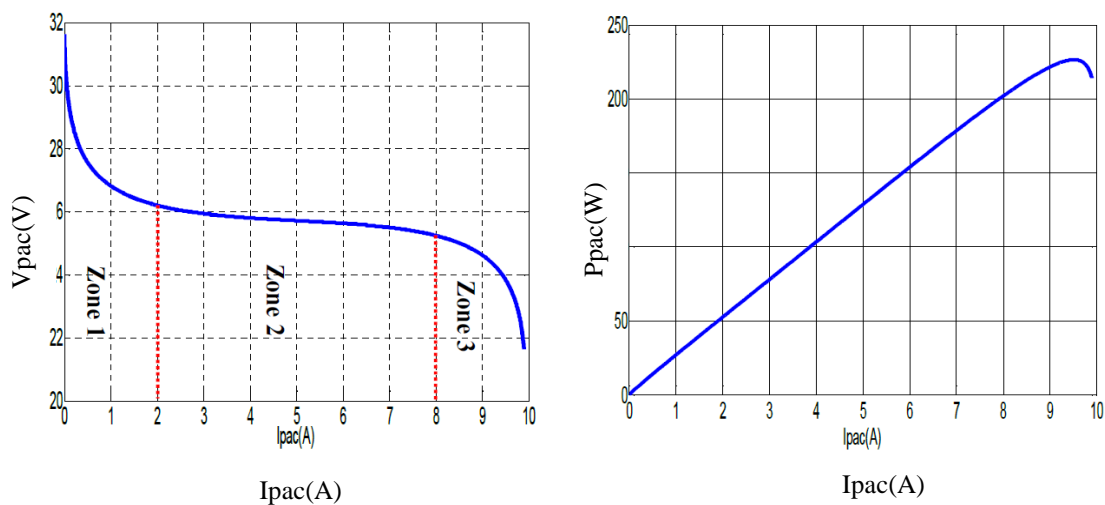


Figure II.10 : Caractéristique $V_{pac}(I_{pac})$ et $P_{pac}(I_{pac})$ à $T=25^{\circ}\text{C}$

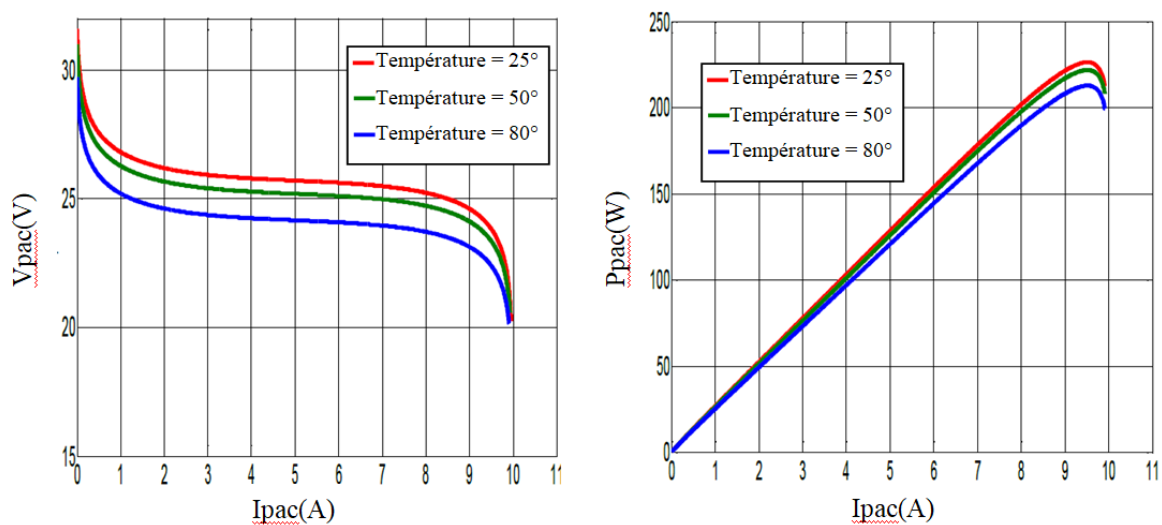


Figure II.11 : Caractéristique $V_{pac}(I_{pac})$ et $P_{pac}(I_{pac})$ pour différentes températures

II.3.4 Modélisation du hacheur boost (élevateur)

La tension de la pile à combustible est inférieure à la tension de bus continue. Ainsi, nous utilisons un convertisseur Boost pour réguler la tension de sortie de la pile à combustible. La Figure (II.12) montre l’adaptateur DC-DC composé d’une inductance L, d’une capacité C, d’une diode D et d’un commutateur Mosfet. La sortie est chargée avec les propriétés de résistance de l’adaptateur de lot DC-DC, comme montre la figure présentée ci-dessous : [81]

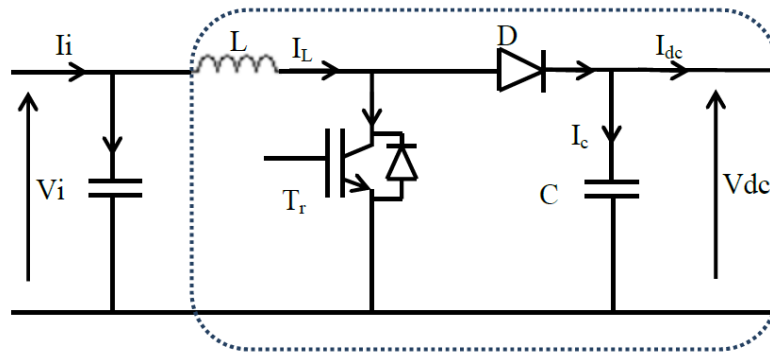


Figure II.12 :schéma de Convertisseur Boost.[82]

Les équations électriques du hacheur Boost sont :

$$V_{pv} = L \frac{dI_1}{dt} + (1 - \alpha)V_{dc} \dots \dots \dots (II.31)$$

$$(1 - \alpha)I_1 = C_s \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{dc} \dots \dots \dots (II.32)$$

En valeurs moyennes, la tension de sortie est fonction de la tension d’entrée et du rapport cyclique moyen. Son expression est donnée par l’équation

$$V_{dc} = \frac{1}{(1-\alpha)} V_{pv} \dots \dots \dots (II.33)$$

Et le courant par la relation :

$$I_{dc} = (1 - \alpha)I_1 \dots \dots \dots (II.34)$$

La régulation de la tension de sortie se fait alors en contrôlant le rapport cyclique.

Dans le fonctionnement continu du hacheur et pour une ondulation de courant et de tension donnée, les valeurs des capacités et de la bobine du hacheur peuvent être déterminées comme suit :[83]

$$\begin{cases} L = \frac{V_{pv} \cdot \alpha}{f \Delta I_{pv}} \\ C_s = \frac{V_{pv} I_{dc} \cdot \alpha}{f \cdot V_{pv} \cdot \Delta V_s \cdot (1-\alpha)} \\ C_e = \frac{I_{dc} \cdot \alpha \cdot (1-\alpha)}{f \cdot V_{pv} \cdot \Delta I_{pv}} \end{cases} \dots \dots \dots (II.35)$$

II.4.Modélisation des éléments de stockage :

II.4.1 Modélisation de la batterie [84]

Il existe différents types de modèles de batteries dans la littérature. Le modèle de la batterie choisi dans cette présente étude utilise une source idéale de tension mise en série avec une résistance et une capacité comme la montre la figure suivante :

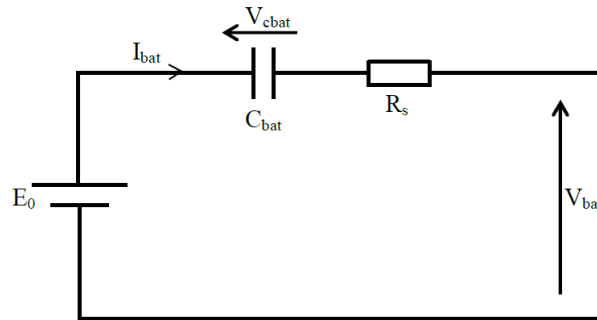


Figure II.13: Modèle R-C de la batterie.[84]

$$V_{bat} = E_0 - R_s * I_{bat} - V_{cbat} \dots \dots \dots (II.36)$$

On définit également l'état de charge (Soc) de la batterie, est le rapport entre la capacité actuelle de la batterie et sa capacité totale. L'état de charge est un paramètre très important pour gérer correctement la batterie

$$SOC = \left(1 - \frac{Q_{bat}}{C_{bat}} \right) * 100 \dots \dots \dots (II.37)$$

Tel que :

$$Q_{bat} = I_{bat} * t_{bat} \dots \dots \dots (II.38)$$

$$C_{bat} = \frac{Q_{bat}}{V_{bat}} \dots \dots \dots (II.39)$$

On peut écrire les équations suivantes : [85]

$$E'_0 = N_s * E_0 \dots \dots \dots (II.40)$$

$$C'_0 = \frac{N_p}{N_s} * C_{bat} \dots \dots \dots (II.41)$$

$$R'_s = \frac{N_p}{N_s} * R_s \dots \dots \dots (II.42)$$

Pour déterminer la capacité (C_{bat}) de batterie :

$$C_{bat} = \frac{E_{bat} * N_j}{V_{bat} * \eta_{bat} * D} \dots \dots \dots (II.43)$$

II.4.1.1 Modélisation du convertisseur DC-DC côté unité de stockage

Le convertisseur Buck-Boost est un inverseur de tension à stockage inductif, la tension en sortie est toujours de signe contraire à la tension en entrée [42]. Tandis que lorsque le transistor est fermée le courant dans l'inductance augmente, l'énergie est stockée, et quand le commutateur

est ouvert la tension à travers l'inductance est renversée et l'énergie stockée se transfère vers la charge via la diode.

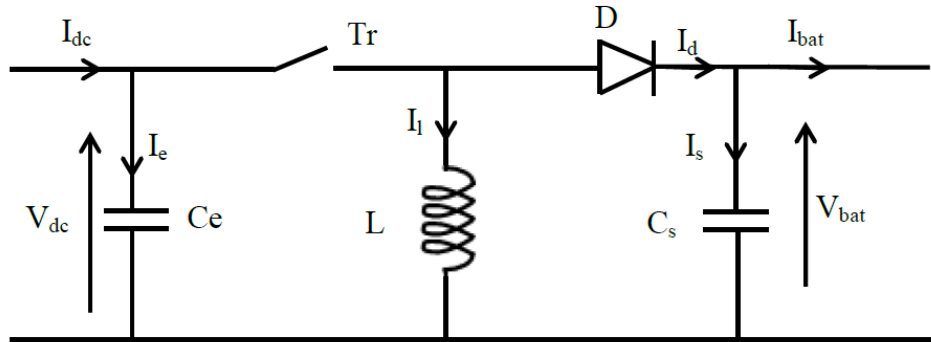


Figure II.14 : Schéma d'un hacheur Buck-Boost [42]

La valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance est nulle, par conséquent l'équation de la tension aux bornes de la batterie décrivant le fonctionnement en conduction continue est donnée par :

$$V_{bat} = -\frac{\alpha}{(1-\alpha)} V_{dc} \dots \dots \dots (II.44)$$

Si nous admettons que la puissance échangée entre la batterie et le bus se conserve, alors nous pouvons écrire:

$$I_{bat} = -\frac{(1-\alpha)}{\alpha} I_{dc} \dots \dots \dots (II.45)$$

Avec I_{dc} , le courant qui traverse le condensateur.

II.4.2 modélisation de super-condensateur [35]

La modélisation la plus simple d'un super-condensateur est composée d'une capacité idéale en série avec une résistance (modèle RC simple), mais ce modèle ne permet pas de prendre en compte tous les phénomènes existants au sein d'un super-condensateur. Un autre modèle similaire au précédent qui modélise l'effet de l'autodécharge en ajoutant une résistance en parallèle avec la capacité .Il existe un autre modèle non linéaire qui contient plusieurs branches RC en parallèle. La première branche de ce dernier possède une capacité variable en fonction de la tension, mais ce modèle est pris et simplifié à deux branches RC. La première branche dite principale décrit les phénomènes rapides (charge, décharge) et la deuxième dite lente pour décrire la redistribution interne de l'énergie après les dits phénomènes [89].

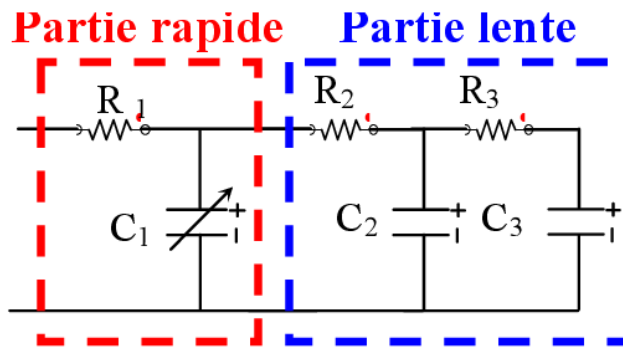


Figure II.15: Schémas électriques équivalents d'un super-condensateur. [89]

A partir du modèle à deux étages RC de la figure (II.15) , les équations suivantes peuvent être extraites [90]:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1 \frac{dV_1}{dt} = \frac{V_2 - V_1}{R_2} - I_{SC} \\ C_2 \frac{dV_2}{dt} = -\frac{V_2 - V_1}{R_2} \\ V = V_1 - R_1 I_{SC} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (II.46)$$

Ce modèle peut aisément être modélisé grâce à une représentation sous forme d'équations d'état:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \dots\dots\dots (II.47)$$

Avec :

$$x = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}, u = I_{SC}, y = V_{SC}, A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_2 C_1} & \frac{1}{R_2 C_1} \\ \frac{1}{R_2 C_2} & -\frac{1}{R_2 C_2} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} \\ 0 \end{bmatrix}, C = [1 \quad 0]$$

Pour un super condensateur de capacité C_{SC} , sous une tension V_{SC} , l'énergie stockée E_{SC} est donnée par l'équation suivante/

$$E_{SC} = \frac{1}{2} C_{SC} \cdot V_{SC}^2 \dots\dots\dots (II.48)$$

La notion d'état de charge (SOC) est dans ce cas définie relativement à l'énergie stockable. Dans certaines applications de traction électrique, le SOC est considéré comme une variable de décision. Cette grandeur est exprimée en pourcentage d'énergie et définie par la relation suivante[35]

$$SOC = E_{SC_res} / E_{SC_act} \dots\dots\dots (II.49)$$

Avec :

E_{SC_res} : Energie restante des supercondensateurs

E_{SC_act} : Energie nominale actuelle des supercondensateurs (au cycle considéré).

II.5 Modélisation Bus Continu [42]

Le couplage du système hybride constitue un système photovoltaïque, aussi un banc de batteries et super-condensateurs est effectué par l'intermédiaire d'un bus continu,. Il est donc nécessaire d'avoir le modèle mathématique de ce circuit.

Le courant dans le bus continu est donné par :

$$I_{dc} = C \frac{dV_{dc}}{dt} \dots\dots\dots(II.50)$$

$$I_{dc} = I_{pv} + I_{pac} \pm I_{batt} - I_{charge} - I_{elect} \dots\dots\dots(II.51)$$

Où :

- ❖ I_{pv} : est le courant du système photovoltaïque.
- ❖ I_{pac} : courant de la pile à combustible.
- ❖ I_{batt} : est le courant de charge/décharge de la batterie.
- ❖ I_{charge} : est le courant de la charge.
- ❖ I_{elect} : est le courant de l'électrolyseur.

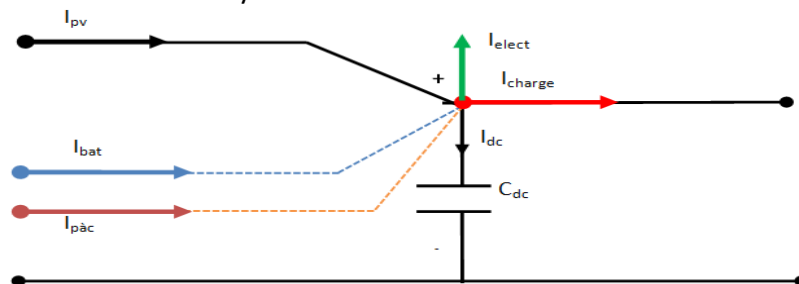


Figure II.16: Modèle du bus continu. [42]

Le système d'énergie hybride étudié est connecté avec le système de stockage d'énergie à travers un bus continu, où ce dernier est lié à un onduleur pour la conversion du courant continu en courant alternatif, pour puisse être relié au réseau électrique. Un filtre RLété connecté à la sortie de l'onduleur qui permet d'éliminer les harmoniques engendrés à cause de la commutation.

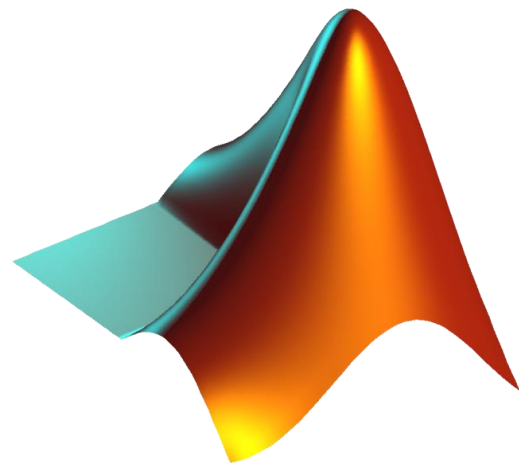
II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modélisé notre système électrique hybride proposé (photovoltaïque, pile à combustible, super condensateur, batterie et les convertisseurs statiques). Cette modélisation est une étape essentielle qui nous permet d'introduire un certain nombre de modèles puis évaluer les caractéristiques de chaque élément de notre système.

Afin de bien exploiter l'énergie fournie par ces sources on doit les commander par des techniques de maximisation de puissance. Dans le chapitre suivant, nous allons étudier la commande permettant le contrôle et la commande optimale et a gestion de tous les sous-systèmes, ainsi que l'optimisation de leurs énergies produites.

Chapitre III

CONTROLE OPTIMISATION ET GESTION DES ÉLÉMENTS DU SYSTÈME HYBRIDE



III.1 Introduction

L'objectif principal d'un système de production électrique est de pouvoir fournir l'énergie demandée par la charge, quel que soit les variations de l'énergie produite. Ainsi les variations de la production sont causées par la nature aléatoire des ressources renouvelables, en plus les fluctuations de la charge selon les périodes annuelles ou journalières ne sont pas forcément corrélées avec ces ressources. Nous ne pouvons pas contrôler les conditions climatiques et nous ne pouvons pas imposer au consommateur la quantité d'énergie qui doit être consommée. Par conséquent, une stratégie de contrôle est nécessaire pour gérer d'une manière optimale l'énergie électrique produite afin d'assurer la continuité de service [1].

L'objectif de la commande du système d'énergie hybride est de pouvoir fournir l'énergie demandée par la charge, malgré les grandes variations de l'énergie produite causées par la nature stochastique des ressources renouvelables [2]. Le principe de la commande appliqué consiste à contrôler les tensions des sources d'énergie renouvelable de telle sorte qu'elles seront égales à la tension du bus à courant continu, quelque soit les variations de l'éclairage et de la vitesse du vent et d'extraire le maximum de puissance des sources renouvelables.

Afin d'améliorer le rendement de notre système multi-sources, il faut assurer l'exigence de la charge sans interruption, protéger le système de stockage (l'élément clef dans les SEH) contre les surcharges et les charges profondes, par conséquent, prolonger sa durée de vie et optimiser au mieux la répartition de la puissance entre les différents éléments qui constituent le SEH [1]. Une stratégie de gestion de l'énergie est nécessaire

Dans le chapitre précédent, nous avons établi les modèles mathématiques de chaque composant du système multi-source: PV, PAC, super condensateur et batterie, plus les convertisseurs statiques. Dans ce chapitre, nous allons synthétiser les commandes nécessaires des éléments constituant notre système de production hybride autonome puis la simulation du système complet et la gestion du flux énergétique entre les différentes sources et la charge. Étant donné que, la puissance produite par une source renouvelable est d'essence fluctuante (dépendante des données météorologiques), un stockage de l'énergie devient nécessaire. Pour notre système, il faut gérer en temps réel le flux énergétique des différentes sources afin d'assurer la demande à tout instant.

III.2 Description du schéma d'énergie proposé pour notre étude

Notre système multi-sources est constitué d'un GPV connecté au bus continu (CC) via un convertisseur boost DC/DC unidirectionnel, et une pile a combustible au même bus via le convertisseur bidirectionnel DC/DC buck-boost, il consiste d'un système de stockage (la batterie, super condensateur). Le SEH est conçu afin d'alimenter une charge DC variable et/ ou alternative comme présentée à la figure III.1

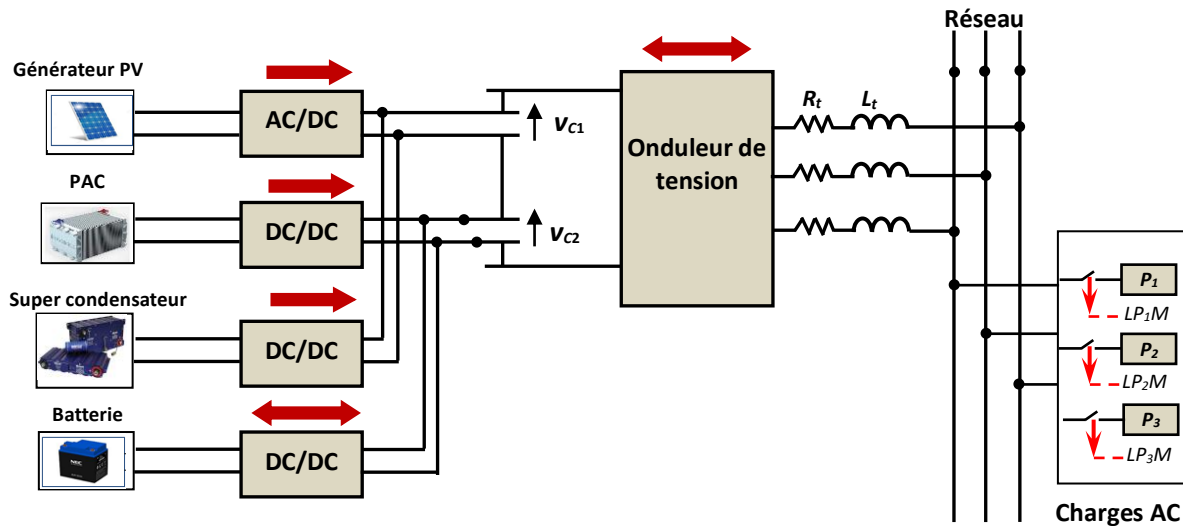


Figure III.1: Synoptique du système hybride étudié connecté à une charge alternative

III.3 Motivation du point de vue des techniques de contrôle

Comme mentionné précédemment, la création de systèmes de contrôle avancés est nécessaire pour répondre aux exigences du code du réseau et augmenter l'efficacité de la chaîne hybride. Le contrôle technique des convertisseurs de puissance est un domaine de recherche et d'actualité. La figure (III.2) résume les méthodes de contrôle connues. Le contrôle en mode glissant, intelligent et prédictif sont des techniques de contrôle avancées, tandis que l'hystérésis et le contrôle linéaire sont des techniques de contrôle classiques.

De nombreux travaux de recherches ont été présentés sur les techniques du contrôle classique des convertisseurs multi niveaux utilisés dans les systèmes d'énergies renouvelables, ce type de contrôleurs classique utilise des régulateurs PI linéaires en cascade et une modulation de largeur d'impulsion/vectorielle spatiale (PWM/SVM). L'approche favorable à l'utilisation de la méthode de contrôle classique avec PWM/SVM est la fréquence de commutation fixe. Le fonctionnement à fréquence de découpage inférieure est une exigence importante au niveau MW pour minimiser les pertes de commutation. Au cours d'une telle condition, les techniques de contrôle classiques imposent plusieurs défis techniques/opérationnels tels que [42] :

- ❖ Caractéristiques des performances non symétriques dues à la nature non linéaire prédominante de convertisseurs de puissance.

- ❖ Harmoniques d'ordre inférieur significatifs qui provoquent une mauvaise qualité de l'alimentation et des conflits avec les codes de réseau.
- ❖ Réponse transitoire lente en raison de l'étage de modulation à faible bande passante.
- ❖ Couplage de variables de contrôle telles que les courants de grille des axes d et q.
- ❖ Performances dégradées en raison des harmoniques de tension du réseau et du retard de contrôle
- ❖ Approche compliquée pour inclure les contraintes du système dans la conception du contrôleur.

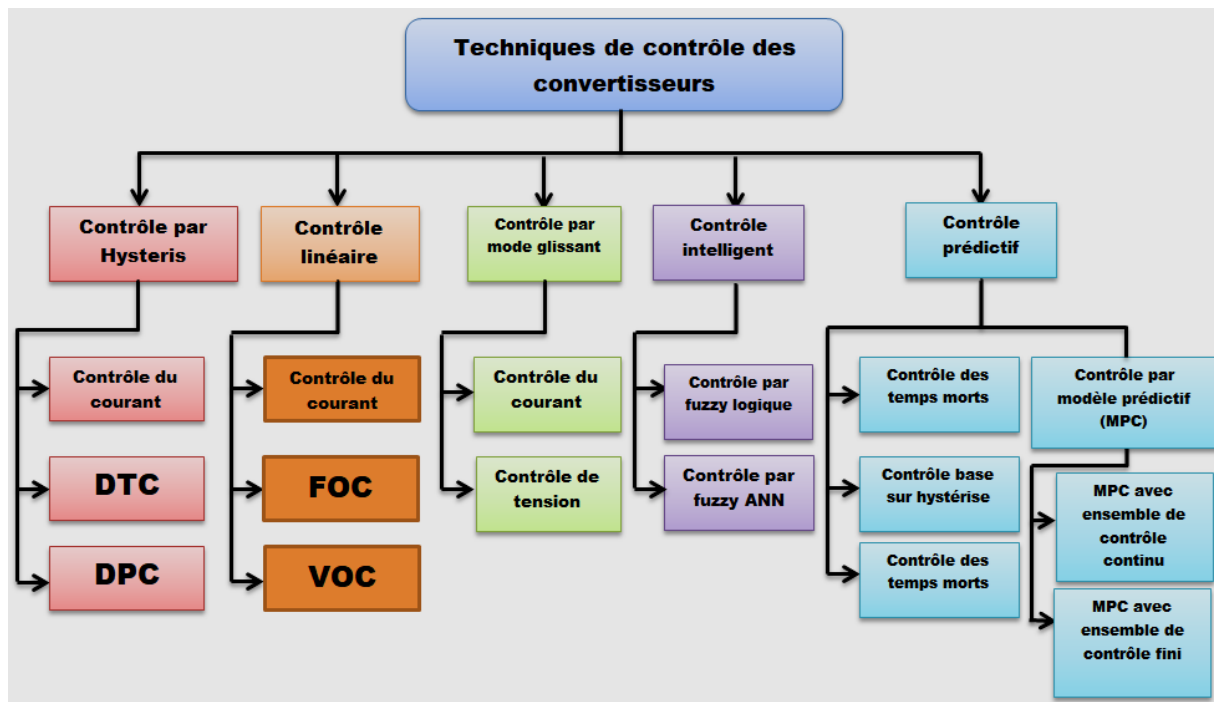


Figure III.2: Classification des techniques de contrôle utilisées dans les systèmes hybrides [42].

III.4. Contrôle de la chaîne photovoltaïque

III.4.1 Contrôle du GPV

Le GPV est connecté au bus continu commun via un convertisseur boost DC/DC contrôlé pour atteindre le point maximal de puissance. C'est un convertisseur élévateur qui augmente la tension du générateur PV à la tension de sortie souhaitée en fonction de la charge. Le schéma de principe est illustré à la figure III.3, il se compose d'une tension d'entrée DC, d'une inductance L, d'un commutateur S, d'une diode D1, d'un condensateur C pour le filtre et d'une résistance R [6]. Lorsque le commutateur S est activé, l'inductance de suralimentation stocke l'énergie fournie par la source de tension d'entrée et pendant ce temps, le courant de charge est maintenu par le condensateur chargé de sorte que le courant de charge soit continu. Lorsque le commutateur S est sur OFF, la tension d'entrée et la tension d'inductance stockée apparaîtront à travers la charge,

la tension de charge est donc augmentée. Par conséquent, la tension de charge dépend du commutateur S en position ON ou OFF ainsi que le rapport cyclique.

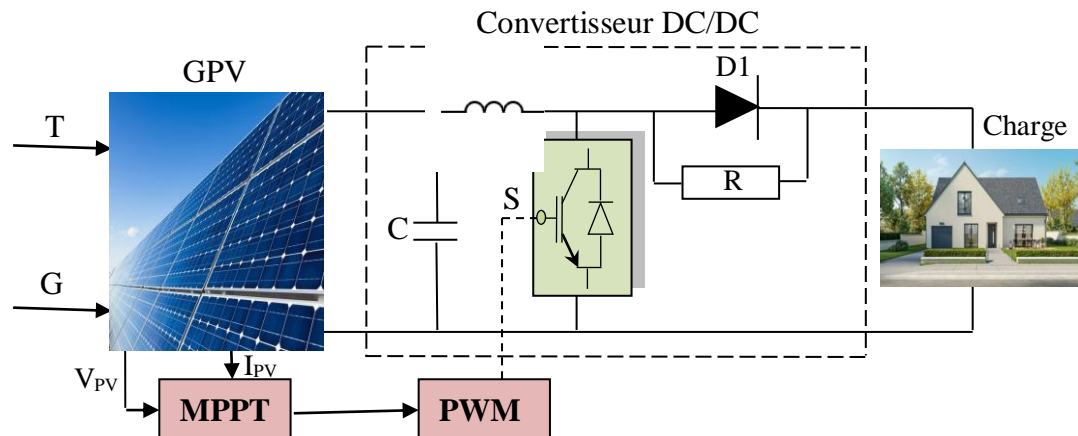


Figure III.3: Convertisseur boost avec contrôle MPPT

L'efficacité du panneau solaire est beaucoup plus améliorée par l'utilisation de la technique MPPT, qui se résume par l'application du théorème de transfert de puissance maximale, ou la charge recevra la puissance maximale lorsque l'impédance de la source est égale à l'impédance de la charge. La MPPT est un moyen qui extrait la puissance maximale de la cellule solaire et modifie le rapport cyclique du convertisseur CC/CC afin d'adapter l'impédance de charge à la source [7].

III.4.2. Les techniques de contrôle MPPT

III.4.2.1 Principe de la recherche du point de puissance maximale

Le principe de la commande MPPT consiste à effectuer une recherche du point de puissance maximale (PPM) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance.

La figure III.3 représente une chaîne de conversion photovoltaïque associée à une commande MPPT. Pour faire fonctionner simplement cette commande, une charge DC est choisie [8]. La commande MPPT est nécessairement associée à un quadripôle qui dans le cas de la conversion solaire peut être réalisé à l'aide d'un convertisseur DC-DC de telle sorte que la puissance fournie par le GPV corresponde à la puissance maximale (P_{MAX}).

Pour contrôler le système PV, on agit sur le rapport cyclique de manière à amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement qu'elles que soient les conditions météorologiques ou variations de charges.

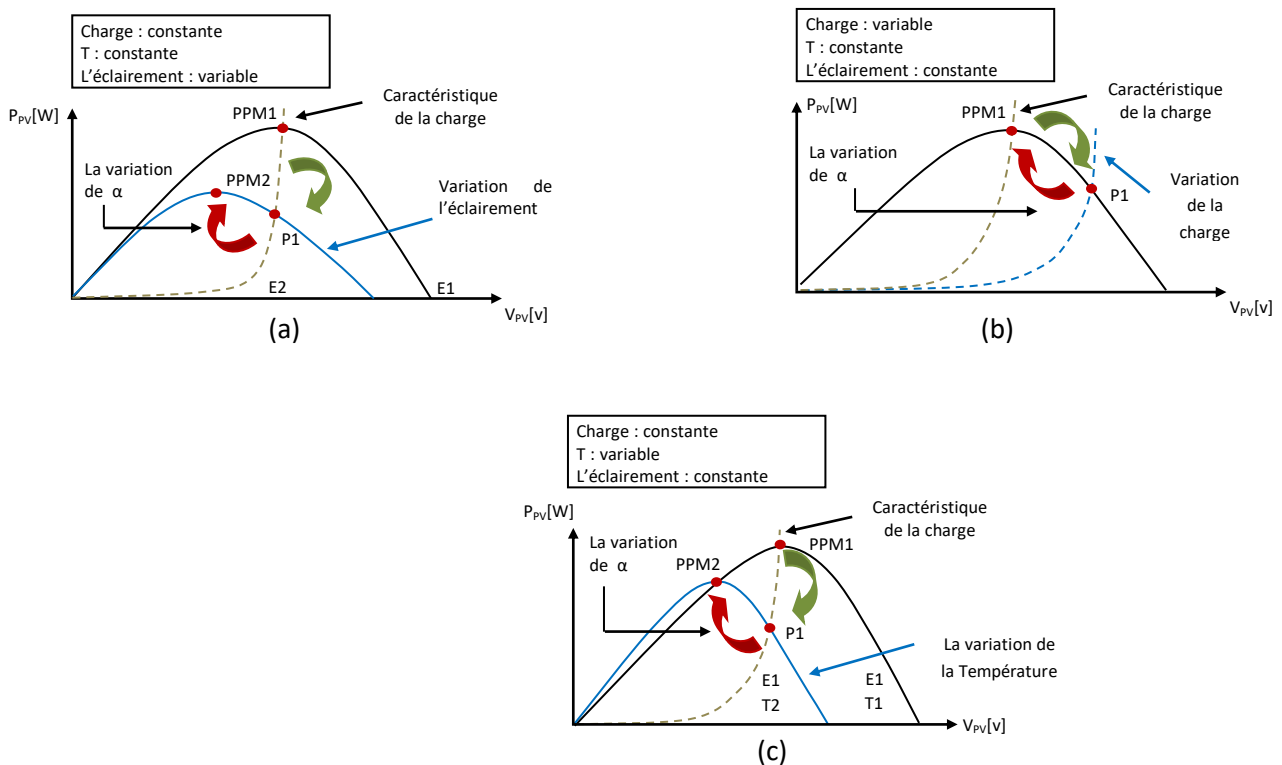


Figure III.4: Recherche de recouvrement du point de puissance maximale [9]

(a) Suite à une variation d'ensoleillement, (b) Suite à une variation de charge, (c) Suite à une variation de température.

Dans la figure III.4 ET pour les 3 cas de variation de l'ensoleillement (cas : a), de la charge (cas : b) et de la température (cas : c), il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2. Donc pour poursuivre et atteindre le PPM dans diverses situations de fonctionnement du GPV [10], il faut agir sur le rapport cyclique du convertisseur statique (CS).

III.4.2.2 Les commandes MPPT classique

Actuellement, il existe différents types d'algorithmes effectuant la recherche du point de puissance maximale [9]. Les plus utilisés sont :

- ❖ Algorithmes Perturber et Observer (P & O).
- ❖ Algorithmes de la conductance incrémentale (INC).

a) Méthode de perturbe et d'observe (P&O)

La méthode P&O est l'une des méthodes MPPT les plus largement utilisées en raison de sa simplicité et de sa facilité de mise en œuvre. Elle agit en créant une perturbation de la tension

continue terminale du générateur photovoltaïque et en observe les conséquences sur la puissance de sortie de celui-ci. Si la puissance augmente avec perturbation, elle continue à faire cette perturbation dans le même sens, sinon elle est inversée.

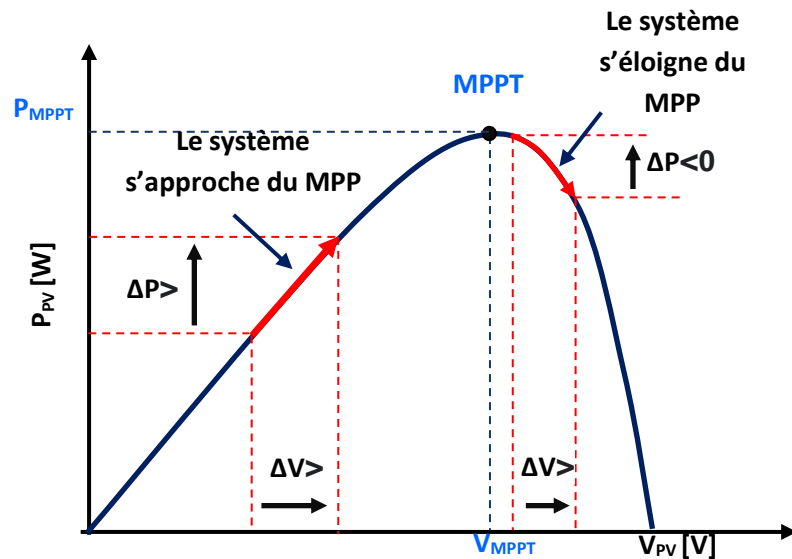


Figure III.5: Caractéristique de puissance dans la P&O [9]

En cas d'augmentation de puissance avec perturbation incrémentale, le point de fonctionnement serait sur le côté gauche du point de puissance maximale, Si une perturbation incrémentielle entraîne une diminution de la puissance, cela indique que le MPP est traversé et que le point de fonctionnement se trouve quelque part sur le côté droit du MPP. Dans ce cas, il inverse sa perturbation et commence à produire une perturbation préjudiciable de la tension du générateur PV afin de suivre le point de puissance maximale. Une fois que le MPP est atteint, le point de fonctionnement serait au point de puissance maximale (figure III.5) [10]. la figure III.7 représente l'organigramme de cette technique.

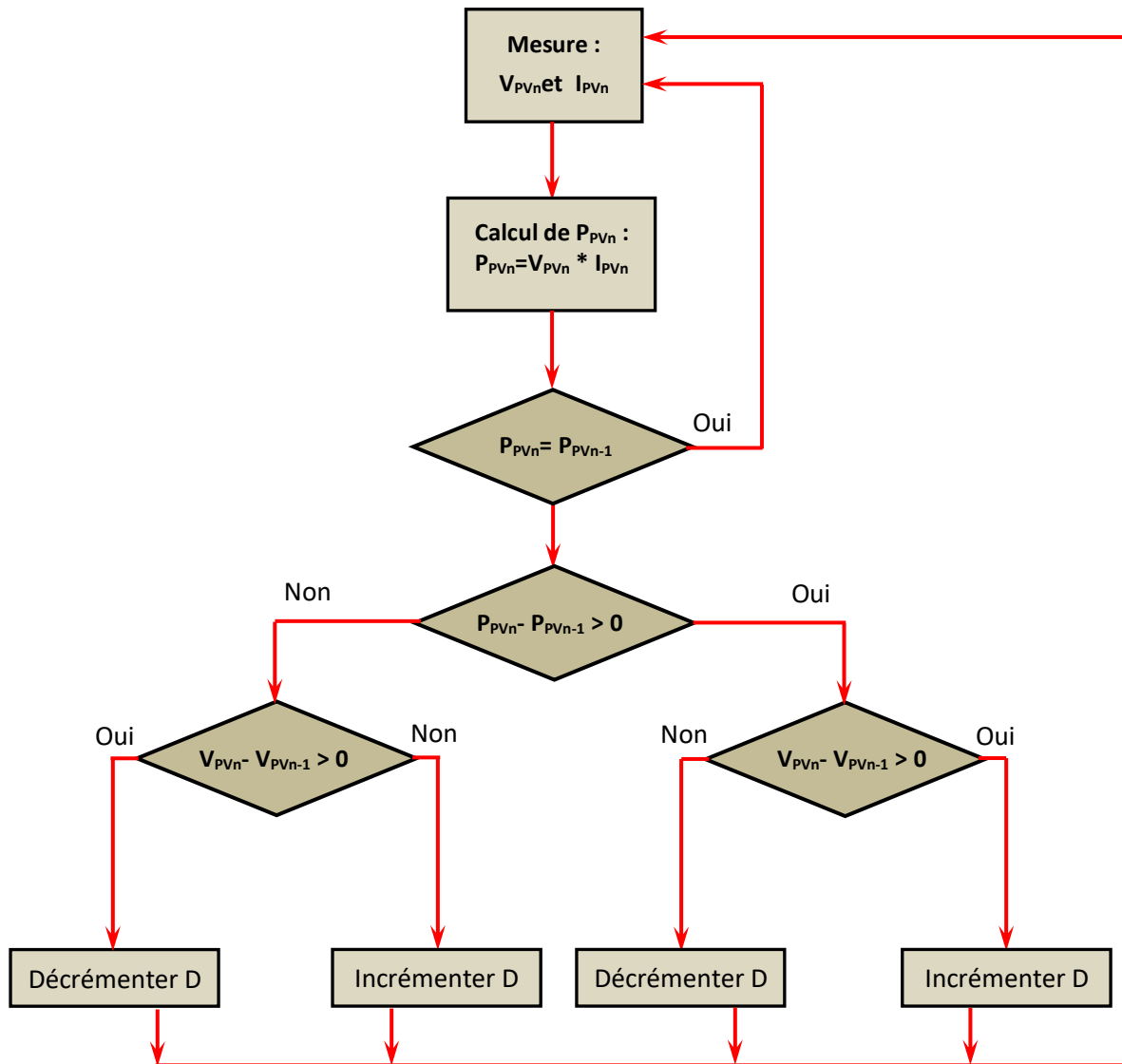


Figure III.6: Organigramme de l’algorithme Perturbation et Observation

Le tableau III.1 résume le fonctionnement de l’algorithme P&O et le changement d’un point « k » à un point suivant « k+1 » est qui se fait avec un pas Constante (méthode déterministe).

Cas	dP	dV	Action
1	$P(k) > P(k-1)$	$V(k) > V(k-1)$	++
2	$P(k) > P(k-1)$	$V(k) < V(k-1)$	--
3	$P(k) < P(k-1)$	$V(k) > V(k-1)$	--
4	$P(k) < P(k-1)$	$V(k) < V(k-1)$	++

Tableau III.1: Cas du fonctionnement de l’algorithme P&O [9, 11]

b) Méthode d'Incrémentale Conductance

La méthode de la conductance incrémentielle est basée sur le fait que la somme de la conductance instantanée (dI/dV) et la conductance incrémentielle soit nulle en MPP. Cette relation découle du fait que la pente de la courbe de puissance du générateur photovoltaïque est nulle au MPP, positive à gauche et négative à la droite. La figure III.7 montre la pente de la courbe de puissance du réseau P-V. Ainsi, la conductance incrémentielle montre que le MPPT a atteint le MPP et cesser de perturber le point de fonctionnement du générateur photovoltaïque. Si cette condition n'est pas remplie, la relation dans laquelle le point de fonctionnement MPPT doit être perturbé peut être calculée [7, 9, 11].

$$P = VI \dots\dots\dots(III.1)$$

D'où en écrivant la dérivée :

$$\begin{cases} \frac{dP}{dV} = V \frac{dI}{dV} + I \\ \frac{dP}{dV} = V \frac{dI}{dV} + I \dots\dots\dots(III.2) \\ \frac{dP}{dV} = V \frac{\Delta I}{\Delta V} + I \end{cases}$$

Donc :

$$\begin{cases} \frac{dP}{dV} = 0 \\ \frac{dP}{dV} > 0 \\ \frac{dP}{dV} < 0 \end{cases} \text{ ou: } \begin{cases} \frac{dI}{dV} = -\frac{1}{V} & \text{(a) au point MPP} \\ \frac{dI}{dV} > -\frac{1}{V} & \text{(b) à gauche du MPP} \\ \frac{dI}{dV} < -\frac{1}{V} & \text{(c) à droite du MPP} \end{cases} \dots\dots\dots(III.3)$$

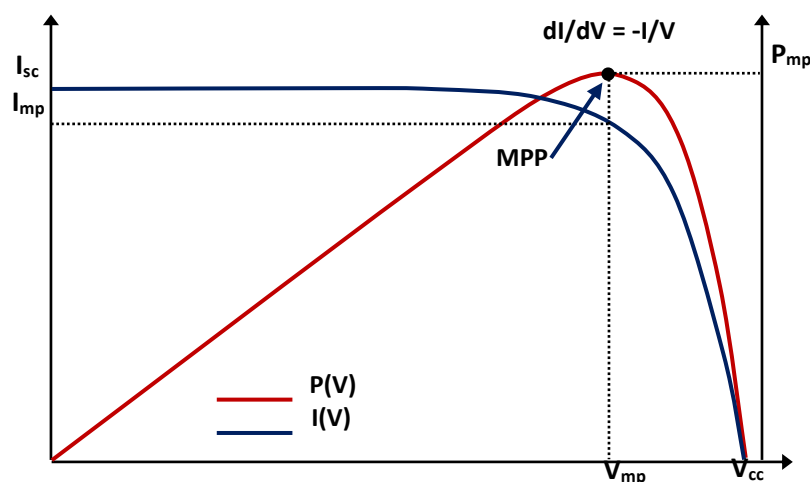


Figure III.7 : Caractéristique de l'Incrémentale Conductance

La figure III.9 illustre l'organigramme de l'algorithme Incrémentation de la conductance.

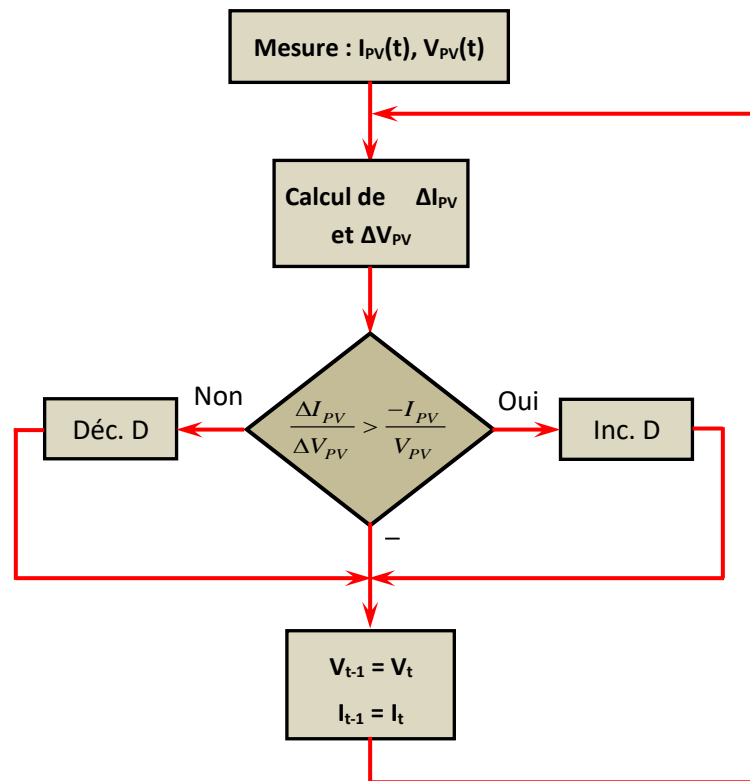


Figure III.8: Organigramme de l'algorithme Incrément de la conductance [9]

III.4.2.3 Techniques d'optimisations méta-heuristiques (Optimisation d'essaim de particules (PSO))

En 1995, James Kennedy et Russell Eberhart ont développé l'algorithme d'optimisation d'essaim de particules (Particle Swarm Optimization (PSO)). Cet algorithme est une technique d'optimisation stochastique inspirée du comportement des animaux tels que les oiseaux [9, 15]. La PSO est une méthode méta-heuristique de recherche globale qui est basée sur l'activité commune et auto-organisationnelle des particules de même groupe [15,16]. Cette technique est régie par des règles de déplacement (dans l'espace des solutions), permettant à ces particules de se déplacer progressivement de leurs positions aléatoires pour atteindre une position locale optimale [9]. La position de la particule est corrigée en fonction : de sa vitesse actualisée (vitesse), la meilleure position personnelle obtenue (P_{Best}) et la meilleure position obtenue au voisinage (G_{Best}). La figure III.9 illustre l'organigramme de l'algorithme PSO ce dernier repose sur les règles, de la mise à jour des positions locales et globale de particules et du groupe, donnée par les équations (III.8, III.9) [9, 15,16] :

$$V_i(t + 1) = w * (V_i(t) + c_1 * \text{rand}_1 * (P_{\text{Best}_i}(t) - D_{\text{fitness}_i}(t)) + c_2 * \text{rand}_2 * (G_{\text{Best}_i}(t) - P_i(t))) \dots\dots\dots(\text{III.4})$$

$$P_i(t + 1) = P_i(t) + V_i(t + 1) \dots\dots\dots(\text{III.5})$$

$$D = \text{PSO}(V, I) \dots\dots\dots(\text{III.6})$$

- ❖ P : Position de la particule.
- ❖ V : Vitesse.
- ❖ D: Rapport cyclique.
- ❖ P_{Best}: Meilleure position de la particule qui correspond à Local_Dbest.
- ❖ G_{Best}: Meilleure position du groupe de particule qui correspond à Global_Dbest.
- ❖ rand: Variable aléatoire uniformément distribuée sur un intervalle de [0, 1] (fonction définie dans MATLAB).

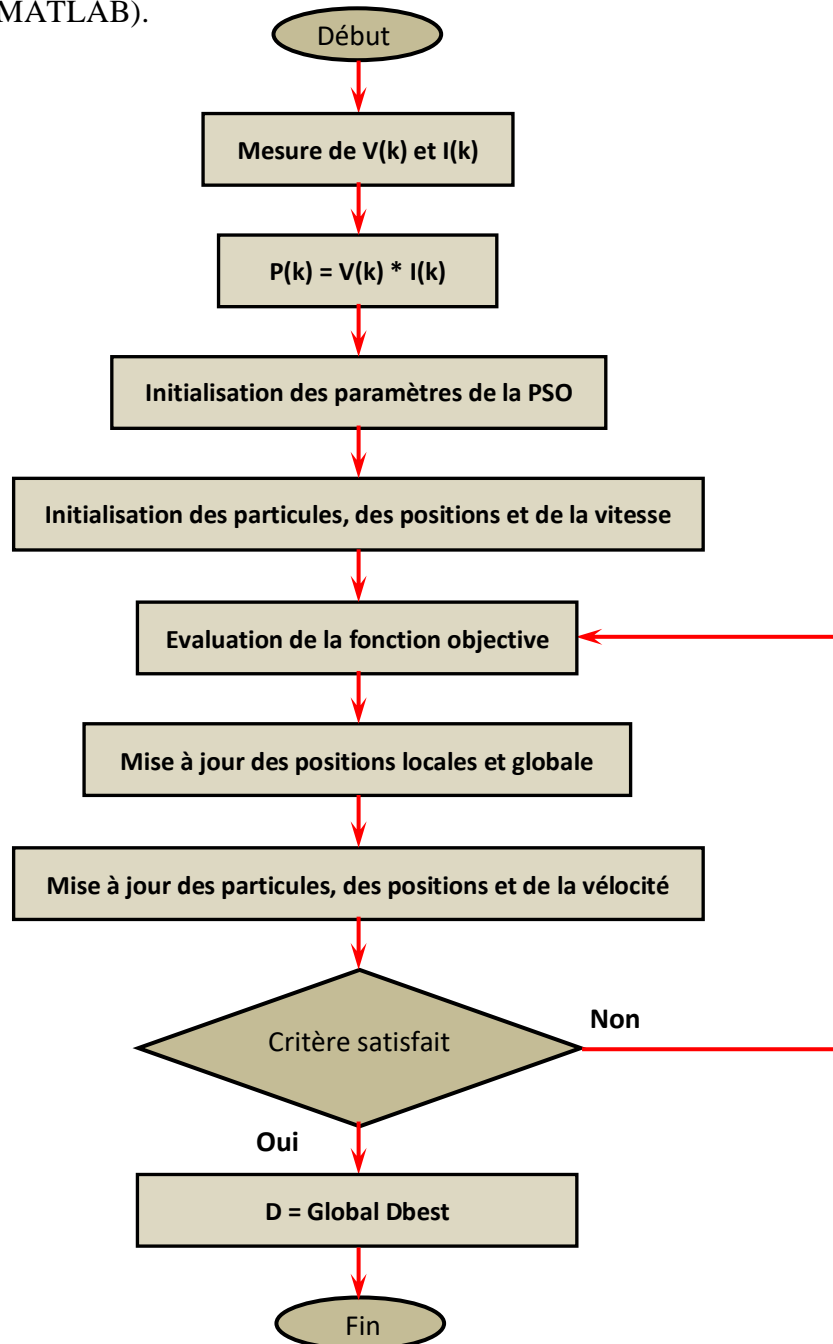


Figure III.9 : Organigramme de la PSO [9]

L'organigramme PSO consiste à satisfaire l'équation (III.10). Cet organigramme repose sur les étapes suivantes :

1. Initialisation des paramètres de la PSO.

2. Initialisation des particules, des positions et de la vitesse.

a) L'initialisation des particules revient à attribuer la valeur de zéro aux composantes précédentes et nouvelles des vecteurs P_{PV} :

$$P_{PV_ancienne} = \text{zéro}(1, \text{swarms}) \dots\dots\dots(III.7)$$

$$P_{PV_nouvelle} = \text{zéro}(1, \text{swarms}) \dots\dots\dots(III.8)$$

b) L'initialisation des positions revient à attribuer des valeurs aléatoires entre 0 et 1 aux composantes de vecteur de positions qui sont ceux des rapports cycliques :

$$D_cur = 0.3 * \text{rand}(1, \text{swarms}) \dots\dots\dots(III.9)$$

c) L'initialisation aléatoire de la vitesse est définie par l'équation suivante :

$$\text{Vel} = 0.5 * \text{rand}(1, \text{swarms}) * (V_{\max} - V_{\min} + V_{\min}) \dots\dots\dots(III.10)$$

3. L'évaluation de la fonction objective dans cet algorithme consiste à comparer la précédente puissance avec la nouvelle puissance (l'équation (III.15)).

$$P_{PV_ancienne} = P_{PV_nouvelle} \dots\dots\dots(III.11)$$

Pour une itération donnée et pour chaque position on calcule $P_{PV_nouvelle}$ à partir des valeurs de D_Cur et on détermine le nouveau GMPP. Donc on définit le meilleur rapport cyclique local, ensuite on compare le nouveau G_{MPP} avec le précédent G_{MPP} selon l'équation suivante [16]:

$$GMMP_{ancienne} = GMMP_{nouvelle} \dots\dots\dots(III.12)$$

4. Le premier critère d'arrêt à satisfaire repose sur l'équation (III.9). Si le $G_{MPP_nouvelle}$ est égal au $G_{MPP_ancienne}$, donc le point de fonctionnement a atteint le G_{MPP} et le rapport cyclique qui lui correspond (D) est égal au meilleur rapport cyclique global ($Global_{D_{best}}$). La seconde condition pour que l'algorithme PSO s'arrête est d'atteindre le nombre d'itérations sans satisfaire l'équation (III.9). 5. La mise à jour des positions et de la vitesse repose sur les équations (III.8, III.9)

III.4.3 Résultats de simulation et interprétations

Dans le but de comparer les performances de l'application des algorithmes cités ci dessus, à savoir la réponse du système à la possibilité d'avoir le maximum de puissance, on a simulé le fonctionnement du système avec un profil d'éclairnement variable.

Les simulations effectuées ont pour objectif de vérifier et valider le schéma proposé ou ont à utiliser trois techniques MPPT (P&O, IC et PSO) Elles sont évaluées à l'aide du logiciel MATLAB/SimPowerSystem. Les paramètres du système proposés sont répertoriés dans l'annexe A. La quantité d'énergie générée/fournie par le générateur photovoltaïque dépend de l'irradiation solaire variable $G = [1, 0.5, 0.2, 0.7] * 1000 \text{ W/m}^2$ au moment $t = [0, 2, 5, 8, 15] \text{ s}$ respectivement et la température $T = 20^\circ\text{C}$.

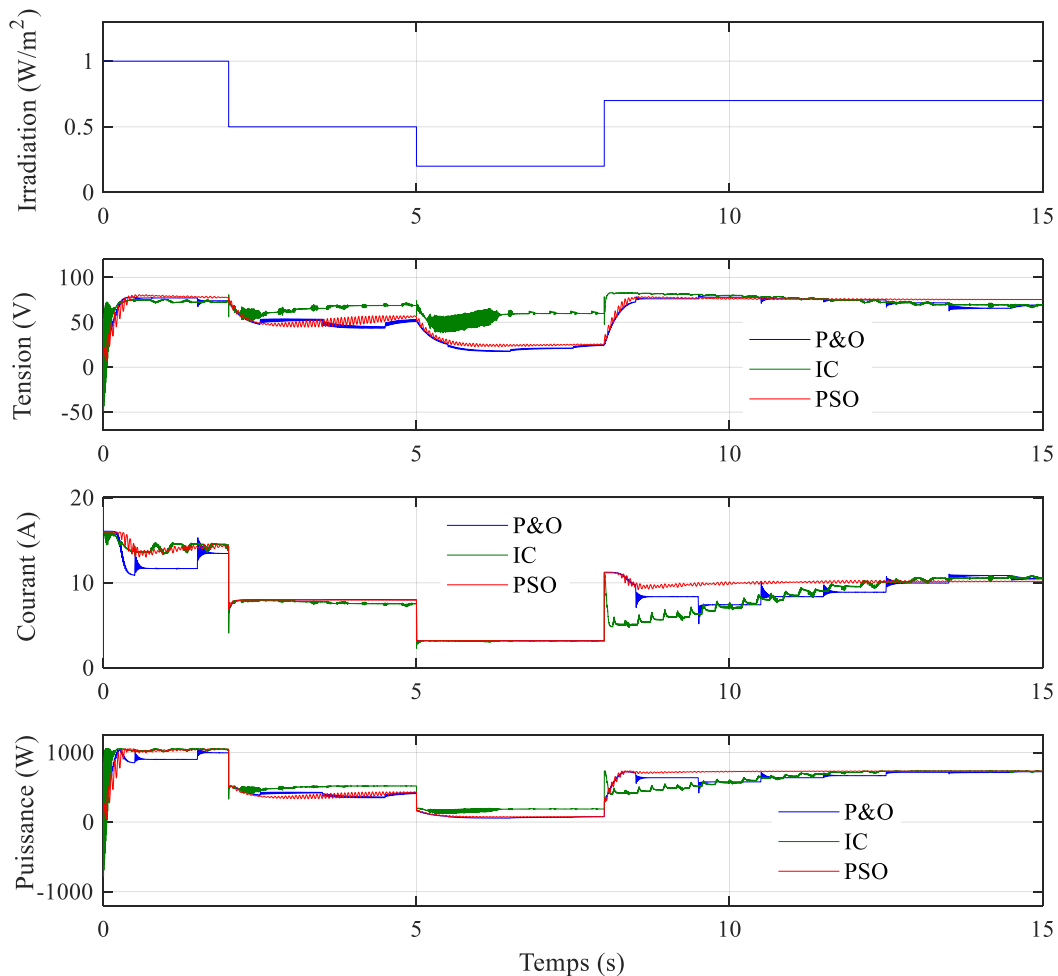


Figure III.10: Caractéristiques électriques du générateur photovoltaïque en utilisant les trois techniques MPPT choisies pour un ensoleillement variable

D'après les figures III.10 et III.11, Les limites du taux d'éclairement et des changements de température sont incluses et la simulation donne des bonnes performances et une puissance maximale à la sortie du générateurs photovoltaïque

- ❖ Dans l'approche MPPT P&O, On voit que le système suit les conditions d'environnement car les puissances en régime permanent sont successivement égales à 1025, 510, 185, 718 et 600 W ;

- ❖ Dans l'approche IC (conductance incrémentielle) au point de puissance maximale, les valeurs en régime permanent (1050, 190, 732 et 600 W) sont assez proches des valeurs obtenues.
- ❖ On ce qui concerne la technique PSO, celle ci montre son efficacité de trouver le point maximal de puissance avec un temps plus rapide que les deux autre méthodes, les valeurs de puissance en régime permanent sont de 1050, 512,190 et 700 W.

Les résultats de simulation prouvent que les algorithmes : P&O et PSO sont capables de suivre la variation de l'éclairement et de la température afin d'atteindre le MPP. La réponse dynamique de l'IC présente des ondulations indésirables qui sont considérées comme un dangereux désavantage pour système PV. Donc il est évident que la puissance PV extraite avec PSO est meilleure que celles des techniques P&O et IC.

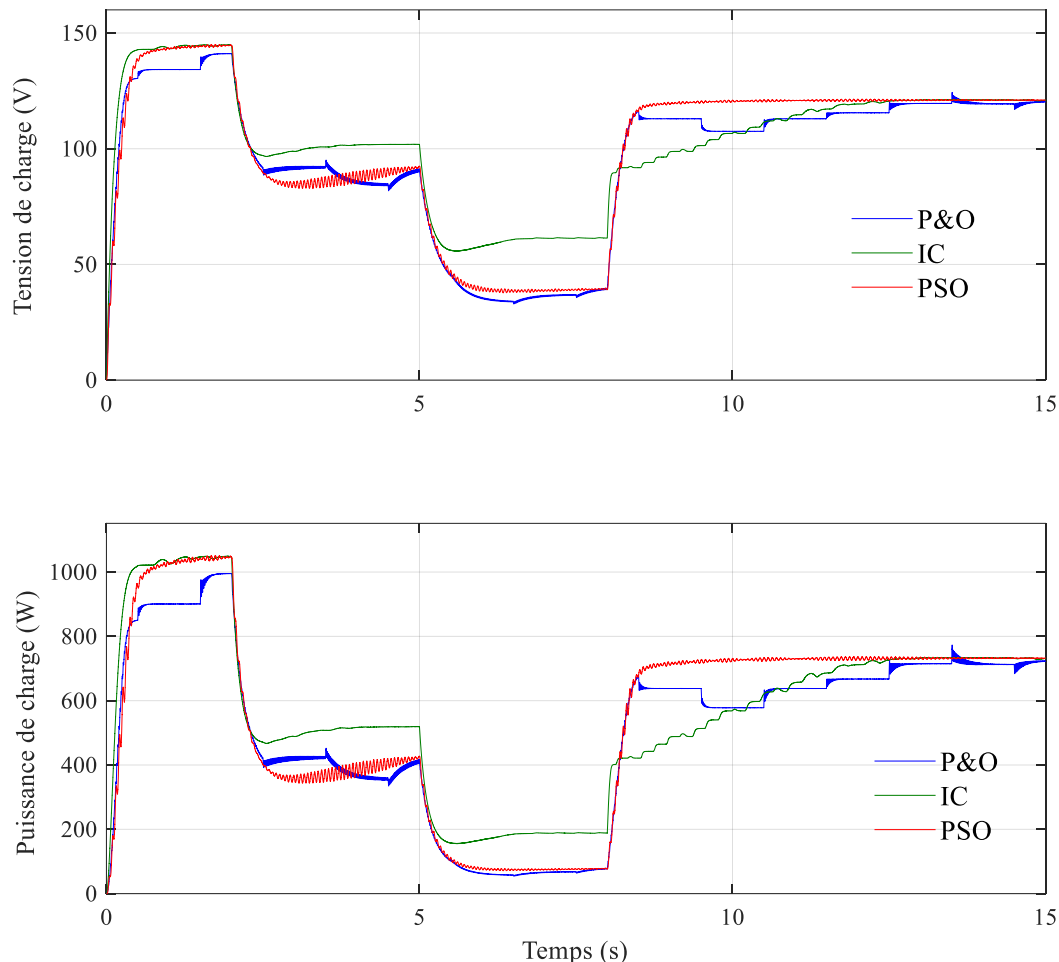


Figure III.11 : Tension et puissance de charge obtenus par les trois techniques MPPT choisies

Pour les résultats de simulation de la figure III.10, on a proposé une étude comparative des méthodes P&O, IC et PSO pour la tension et puissance de charge et on a constatés en

termes de d'efficacité, rapidité et de robustesse sous différentes conditions atmosphériques que la PSO présente un rendement supérieur par rapport aux autres méthodes.

III.5 Contrôle de la pile à combustible

III.5.1 Dimensionnement

La pile à combustible (PAC) est un dispositif de conversion directe de l'énergie chimique du combustible en énergie électrique. La conversion intermédiaire de l'énergie chimique en énergie thermique ou mécanique est omise, de sorte que le rendement du dispositif peut être très élevé. Contrairement à la batterie, qui doit être déconnectée périodiquement pour la recharge [1]. La PAC peut produire de l'énergie électrique sans interruption, tant qu'elle contienne du carburant (tel que l'hydrogène) et un oxydant (tel que l'oxygène), qui peut être rechargé pendant le fonctionnement du PAC.

Le schéma de la figure.III.12 montre les principaux composants du système à PAC considérés dans cette étude [23]. La pile PMFC est connectée au Bus continu à l'aide d'un convertisseur DC/DC, qui permet l'adaptation de la tension de la pile à la tension du bus. Dans ce travail, le convertisseur DC/DC utilisé est de type survolteur (Boost) à découpage. La sortie de la pile à combustible PEMFC est une puissance continue. Lorsqu'un système à pile à combustible fournit la puissance et alimente une charge résidentielle, l'interface de puissance est nécessaire. Ce dernier est un simple convertisseur DC/DC utilisé pour élever la tension de sortie, qui est généralement la tension continue de bus, suivi par un Onduleur DC/AC monophasé ou triphasé.

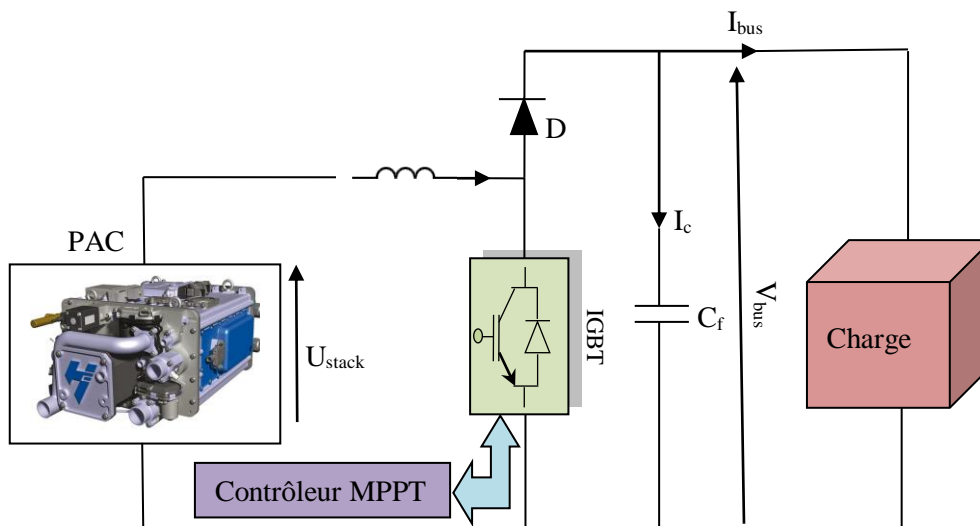


Figure III.12: Convertisseur survolteur (Boost) connecté à la pile à combustible [23]

D'après la figure III.12, l'inductance de lissage L_1 est utilisée pour : limiter l'ondulation du courant dans le convertisseur et dans la source U_{stack} . Le condensateur de filtrage permet de

limiter les ondulations de tension dues au découpage en sortie du convertisseur, il doit être dimensionné convenablement pour garder une tension constante à ses bornes avec une ondulation tolérée, de même pour la bobine, elle doit être aussi bien dimensionnée pour garder un courant constant avec une ondulation maximale [23]. Dans le cas d'un hacheur survolteur l'inductance minimale de lissage L_l est donnée par la relation [III.23] [25] :

$$L_l = \frac{V_{bus}}{4\Delta I_{L_{max}} f} \dots\dots\dots (III.13)$$

Où :

- ❖ V_{bus} : Tension du bus continu (V)
- ❖ f : fréquence de découpage du signal de commande de l'interrupteur (HZ)
- ❖ ΔI_L : Ondulation de courant dans l'inductance (A)
- ❖ L : Valeur de l'inductance de lissage (H)

La valeur minimale du condensateur est donnée par la relation [III.14] :

$$C_f = \frac{I_L}{4 \cdot \Delta V_{bus_max} \cdot f} \dots\dots\dots (III.14)$$

Avec :

- ❖ C_f : Valeur du condensateur de filtrage (F)
- ❖ I_L : Courant dans l'inductance (A)
- ❖ ΔV_{bus} : Ondulation de tension aux bornes du condensateur (V)

III.5.2. Modèle et circuit de commande de la PAC

La pile à combustible fournit une alimentation continue non réglée,

$$P_{fc} = i_{fc} u_{fc} \dots\dots\dots (III.15)$$

La pile à combustible étant considérée comme une source de tension (u_{fc}), la puissance peut être contrôlée en régulant le courant de la pile (i_{fc}). Un filtre starter est nécessaire pour ce réglage.

$$\frac{di_{fc}}{dt} = \frac{u_{fc} - u_{m_fc}^*}{L_{fc}} \dots\dots\dots (III.16)$$

u_{mfc} est la valeur moyenne de la tension modulée du hacheur. Le hacheur DC est décrit par des valeurs moyennes comme ci-dessous [12] :

$$\begin{cases} u_{mfc} = m_{fc} u_{fc} \\ i_{mfc} = m_{fc} i_{fc} \end{cases} \dots\dots\dots (III.17)$$

où: m_{fc} est le rapport cyclique du hacheur et i_{mfc} est la valeur moyenne du courant modulé du hacheur [25].

$$u_{m_fc}^* = \frac{V_{m_fc}^* V_{fc}}{\widehat{V}_{dc}} \dots\dots\dots(III.18)$$

u_{mfc_ref} est la référence de la tension modulée moyenne du hacheur. Il est fixé par le correcteur de courant (PI) (figure III.13) [25] pour maintenir le courant de la pile à combustible égal à la valeur souhaitée i_{fc_ref} :

$$u_{m_fc}^* = PI(i_{fc}^* - \widehat{i}_{fc}) + \widehat{v}_{fc} \dots\dots\dots(III.19)$$

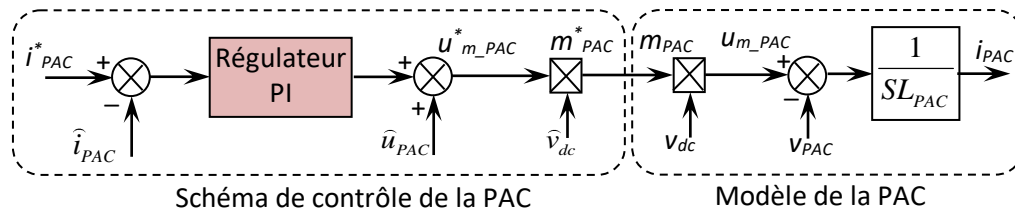


Figure III.13: Schéma fonctionnel de la modélisation et du contrôle du conditionnement de puissance

Lorsque la PAC conduit le courant, la chute de tension apparaît, elle peut donc être écrite comme $V = E - IR - \Delta V_{act} - \Delta V_{con} \dots\dots\dots(III.20)$

Où: E la tension à vide de la pile, I est le courant PAC ; R est la résistance de l'ensemble du circuit électrique, y compris la membrane et les diverses interconnexions ; ΔV_{act} est les pertes d'activation, dues à la lenteur des réactions de polarisation, s'opérant sur les électrodes ; et ΔV_{con} est la chute de tension, due au changement de la concentration des composants actifs dans la zone de réaction [23, 24].

Les expressions correspondantes sont complexes et dépendent de nombreux paramètres, de sorte que pour la création du modèle PAC, les formules empiriques et semi-empiriques sont utilisées, comme, par exemple [12],

$$\Delta V_{act} = A \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \dots\dots\dots(III.21)$$

où i est la densité de courant PAC (mA/cm²), i_0 est la densité d'un certain courant de référence et A est constant ; la formule est valide sous $i > i_0$.

Si dans l'Équation III.30, au lieu de E, substituer $E_c = E + A \ln(i_0)$, alors

$$\Delta V_{act} = A \ln(i) \dots\dots\dots(III.22)$$

La formule suivante est suggérée pour ΔV_{con} dans :

$$\Delta V_{con} = m e^{ni} \dots\dots\dots(III.23)$$

Où : m et n sont des constantes.

La tension de sortie du modèle est calculée par les équations III.30, III.31, III.32 et III.33. Le modèle contient le reformeur, qui transforme le gaz naturel en hydrogène pur. Le reformeur qui remplace le mécanisme d'alimentation en gaz se compose du l'appareil de traitement du gaz et du contrôleur PI qui ajuste le débit de l'alimentation en gaz naturel de manière à obtenir la quantité d'hydrogène demandée. Afin de modérer un effet défavorable de la réponse lente du PAC sur les variations de charge, et également de maintenir la tension de charge en cas de panne courte du PAC [23, 24,27], les autres systèmes de stockage d'énergie connectés en parallèle au PAC sont utilisés, par exemple, les batteries ou (et) les ultra condensateurs.

III.5.3 Résultats de simulation et discussions

La PAC alimente une charge résistive variable. La tension de la PAC est contrôlée par un régulateur PI, afin d'avoir une tension qui soit égale a la tension de référence .

D'après la figure III.14, une augmentation de charge est ce qui implique des croissances en puissances allons de 25 KW puis 40 KW allons jusqu'au 75 KW et ceci qui explique la croissance du courant en fonction de la variation de la charge, tout en maintenant constant la tension à sa valeur de référence.

La variations de courant, lorsque la résistance de charge diminue sont représentées sur la Figure III.15; le régulateur de tension de référence est actionné.

Les résultats de simulation montrent clairement que pour la stratégie de contrôle de la PAC, les grandeurs commandées suivent très bien leur trajectoire de référence, sans dépassement des puissances et sans erreur statique en régime permanent.

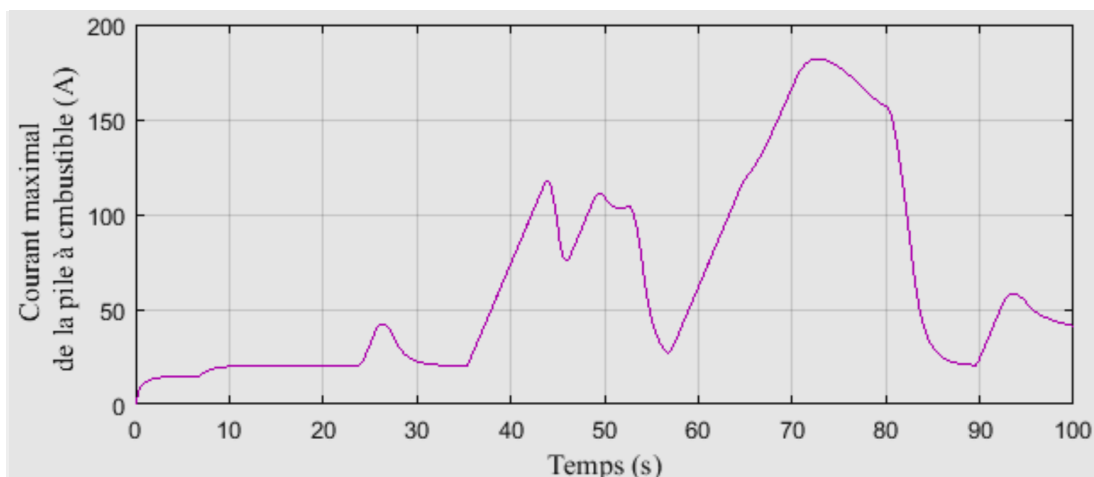


Figure III.14: courant délivrés par la PAC

Le step de courant utilisé lors de cette simulation (figure III.26) reflète la variation de la demande de charge ainsi que la variation de la puissance active demandée, il est bien claire que toute augmentation de courant engendre une diminution de tension de la pile,

Il est possible de dire que la stratégie de contrôle proposée est satisfaisante étant donné que les puissances fournies suivent celles exigées par la charge avec un délai technologique acceptable.

III.6. contrôle de l'énergie du système de stockage hybride

III.6.1 Contrôle de la batterie

III.6.1.1 système de commande

Un système de contrôle en cascade basé sur des contrôleurs PI peut être proposé pour la batterie (figure III.15), dans une telle structure. L'objectif du système de contrôle est de réguler le courant de la batterie afin d'obtenir la puissance requise. Les limites de courant de charge et de décharge et les limites SOC maximales sont également incluses dans le modèle. La batterie est connectée au réseau continu via un convertisseur DC/DC Buck-Boost bidirectionnel [42]. Dans notre cas, la stratégie de commande du convertisseur bidirectionnel comporte deux objectifs : le premier est le contrôle du sens du flux de puissance. C'est-à-dire décider quand la batterie va jouer le rôle d'une source d'énergie et lorsqu'elle est en mode charge (stockage d'énergie) tout cela en fonction de l'évolution de l'état du système multi-sources. Cet objectif est dicté en réalité, par l'algorithme de gestion qui décide dans quelle configuration la batterie doit fonctionner. Le deuxième objectif est de régler la tension du bus continu V_{dc} .

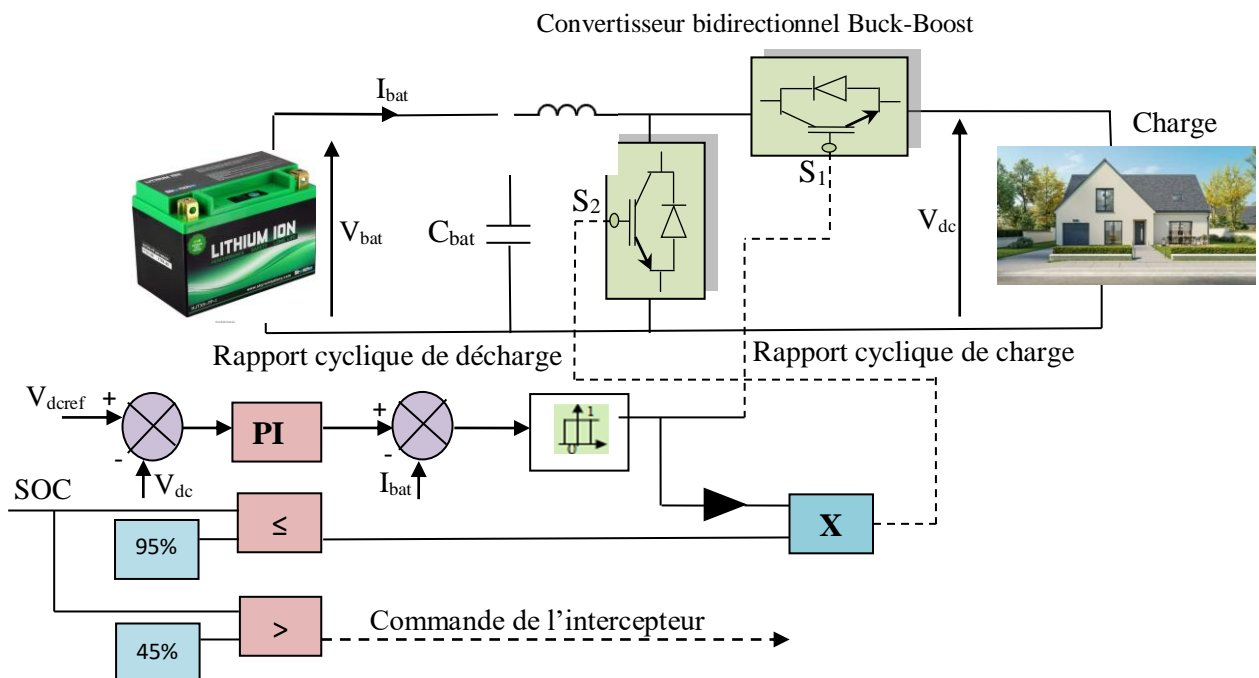


Figure III.15: Contrôle de la batterie [1]

La régulation de la tension du bus continu est mise en œuvre par le hacheur réversible en courant à travers un régulateur classique PI (Proportionnel-Intégral), comme le montre le schéma

principale de la commande du convertisseur illustré dans la figure III.16 [5 , 26]. La tension du bus continu devient inférieure à la valeur de référence en cas où elle est insuffisante pour satisfaire les exigences de la charge. L'énergie manquante est obtenue à partir de la batterie, à condition que l'état de charge de la batterie se trouve dans les limites prédéfinies.

Typiquement, l'état de charge (SOC) de la batterie Lithium est compris entre 45 % et 95 %. En effet, dans notre étude, pendant le fonctionnement normal de la batterie, le SOC est considéré dans la plage ($SOC_{min} = 45\%$) $<SOC<$ ($SOC_{max} = 95\%$).

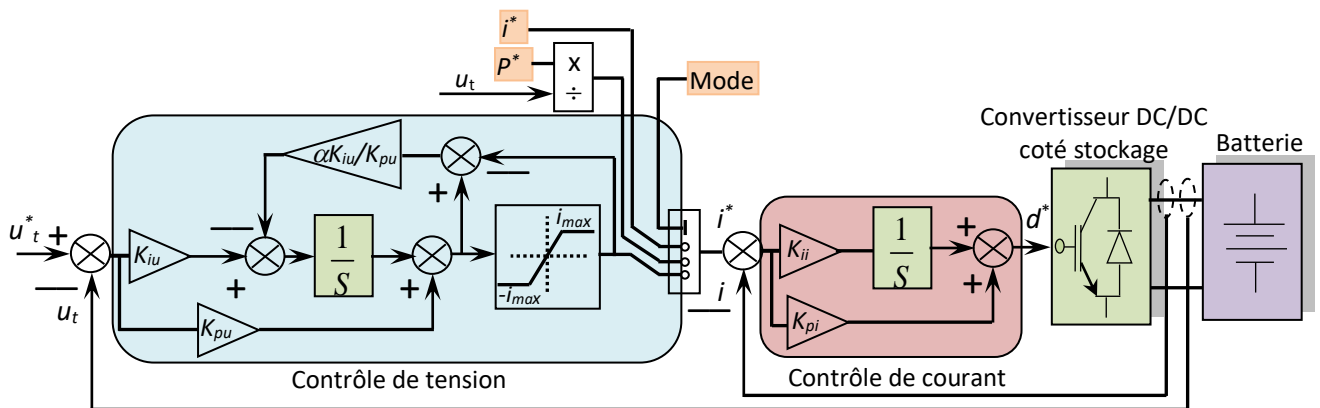


Figure III.16: Schéma de contrôle pour le convertisseur côté stockage rattaché à la batterie [5]

La batterie fonctionnera en mode charge, décharge ou flottant selon les besoins énergétiques et ces modes sont gérés en fonction de la tension du bus continu au point de couplage de la batterie. Par conséquent, La batterie est tenue de fournir le niveau de tension continue nécessaire sous différents modes de fonctionnement de la charge [12].

Le courant de référence est limité par le système de gestion de batterie à des fins de protection. Le profil de référence d'un courant, et la conception du contrôleur, dépendent fortement de l'application finale de la batterie.

L'objectif du convertisseur de la batterie est de maintenir une tension constante sur le bus continu, de sorte que l'ondulation de la tension du condensateur est bien inférieure à la tension en régime permanent [8].

La batterie Lithium est connectée au bus continu commun via le convertisseur continu abaisseur. La tension de liaison continu détectée (V_{dc}) est comparée à la référence de liaison continu (V_{dc}^*) et l'erreur est transmise au contrôleur PI pour obtenir la référence de courant de batterie (i_{bat}^*) sous la forme [25] :

$$i_{bat}^* = k_p (V_{dc}^* - V_{dc}) + k_i \int (V_{dc}^* - V_{dc}) dt \dots\dots\dots(III.24)$$

où : k_p et k_i sont les gains proportionnels et intégraux pour la boucle de contrôle externe.

Le courant de référence de la batterie est comparé au courant de batterie détecté (i_{bat}), et l'erreur est transmise au contrôleur PI pour obtenir le signal de commande ($d_{s3, s4}$) comme suit:

$$d_{s3,s4} = k_p (i_{bat}^* - i_{bat}) + k_i \int (i_{bat}^* - i_{bat}) dt \dots\dots\dots(III.25)$$

où : k_p et k_i sont les gains proportionnels et intégraux de la boucle de régulation interne.

Comme indiqué, en mode « charge à courant constant », un courant constant est appliqué aux bornes de la batterie, ceci est assuré par la boucle de contrôle de courant du convertisseur DC-DC auquel la batterie est connectée. La cellule de la batterie doit être correctement surveillée afin d'éviter une surcharge et une décharge excessive. Une fois que la tension de la cellule atteint la tension de charge maximale, le contrôleur passe en mode tension constante [25].

III.6.1.2 Résultats de simulation et interprétations

Dans la figure III.17, nous présentons le courant, de charge global (total) SOC du périphérique de stockage.

Dans les premières secondes (0 à 10 s), la courbe monte jusqu'à 19 A, ce qui pourrait correspondre à la phase de démarrage d'un système. Cela indique que ce système nécessite un courant élevé pour s'allumer et atteindre son plein fonctionnement.

Peu après le pic de 19 A, la courbe de courant chute avant de monter à nouveau à l'instant 21 s. Cette chute due à une diminution de la charge ou à un ajustement de la tension d'alimentation. La remontée soudaine dans l'intervalle [21s-25s] jusqu'à un pic de 80 A ce qui indique une surcharge

Après le pic de 80 A, la courbe reste constante jusqu'à 95 s. Cela correspondre à une phase où le système maintient une charge constante. Le courant reste stable à un niveau élevé, indiquant une consommation d'énergie constante.

Après 95 s, la courbe de courant commence à chuter, ce qui indique une diminution de la charge ou une diminution de la demande d'énergie. La chute du courant peut être progressive ou soudaine, selon les conditions spécifiques du système.

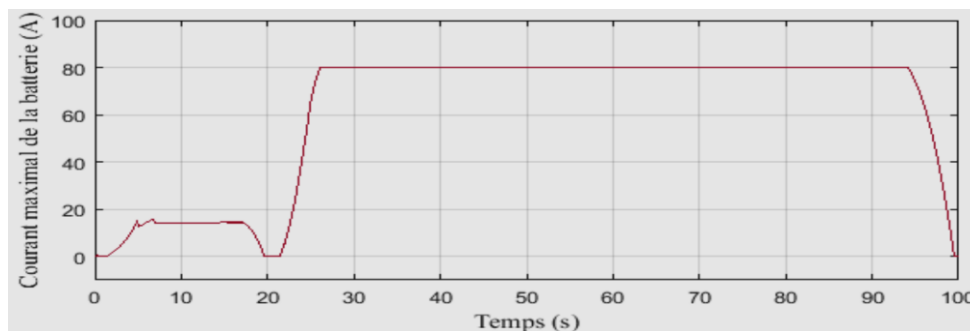


Figure III.17 :le courant de charge global (total) SOC

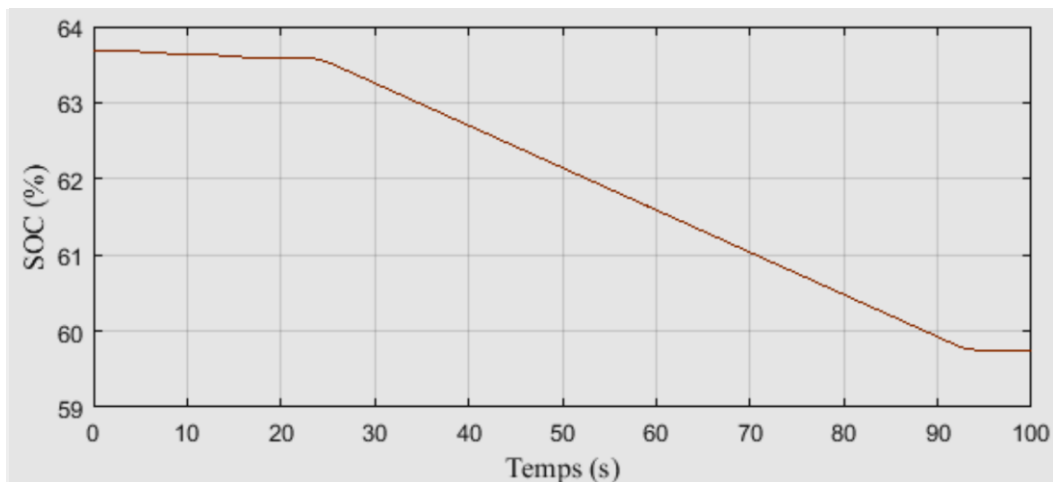


Figure III.18: Courant et SOC de la batterie

Le mode de fonctionnement du convertisseur (charge ou décharge) est régi par le sens du courant. En effet, pour le mode charge, le courant de la batterie est considéré positif alors que pour le mode de décharge il est négatif. Le passage entre les deux modes est manipulé par l'algorithme de gestion qui décide en fonction du sens du courant (positif ou négatif) d'activer le buck ou le boost pour charger ou décharger la batterie. Pour tester la commande du convertisseur bidirectionnel (en mode décharge), nous avons considéré une variation du courant de la charge. Cette variation se traduit par une perturbation au niveau de la tension du bus continu.

La décharge de la batterie passe par trois zones de fonctionnement, on assiste au départ à une chute brusque de la tension, ensuite vient la zone linéaire et pour finir une diminution progressive qui vient annoncer la décharge complète. Dans le but de simplifier la simulation nous avons imposé un courant de décharge constant qui s'annule dès que le seuil minimal de l'état de charge sera atteint, ce rôle est tenu en pratique par le contrôleur de charge. La zone nominale de fonctionnement de la batterie est la zone linéaire

En pratique afin de préserver les propriétés physico-chimiques de la batterie et de prolonger sa durée de vie on limite la charge et la décharge de la batterie, par exemple dans notre cas elle est limitée entre 45% et 95%. Grâce à cette limitation on exploite la zone de fonctionnement linéaire.

III.6.2 Contrôle de super condensateur

III.6.2.1 système de commande

La figure (III.19) montre la structure de commande en puissance d'un système de stockage hybride (batterie + super condensateur) connecté à un bus continu (délivrée par un système de

production photovoltaïque et commandé par deux boucles de courants. Ces boucles internes de courants incluant les lois de commande classiques qui nous intéressent ici. Cela consiste à mettre en place des régulateurs de courant (trois PI fournissant les signaux de commutation des convertisseurs en pilotant le courant de chaque source. En effet, le contrôle de ces courants est primordial, car il permet de protéger les convertisseurs ainsi que les sources (tension / courant). Les simulations et les essais effectués se sont focalisés autour de ces boucles de courants (c-à-d les puissances).

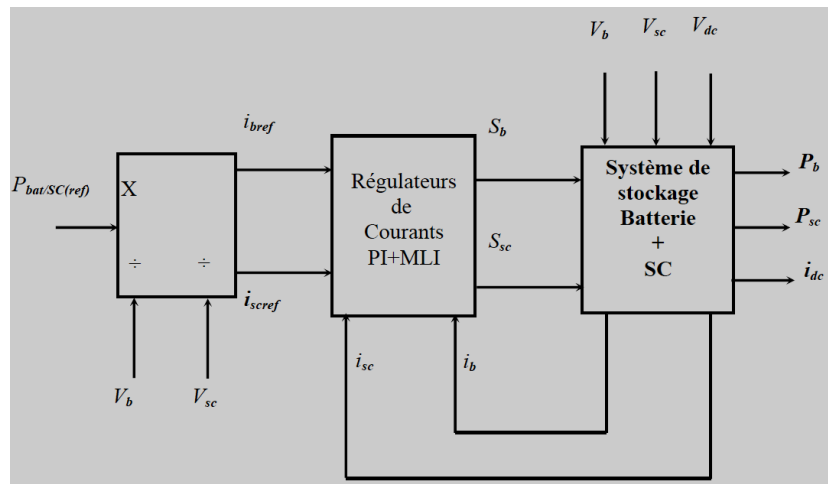


Figure. III.19 : Schéma de contrôle de l'énergie d'un système de stockage hybride

Le courant de la batterie peut être contrôlé de manière relativement plus douce, quelle que soit la fluctuation de la demande de puissance (P_{ref}). La tension aux bornes de la batterie n'est pas obligée de correspondre à la tension du bus DC, ce qui permet un dimensionnement et une configuration souples et efficaces de batteries. Cependant, l'efficacité volumétrique du super condensateur est faible. La caractéristique de charge / décharge linéaire du super condensateur provoque également de grandes fluctuations dans le bus cc.

III.7 Contrôle du bus DC

III.7.1 Description

La synchronisation du courant avec les tensions du réseau et le réglage de la tension du bus continu sont assurés par le convertisseur côté réseau, le contrôle récurrent est utilisé pour contrôler la puissance active et réactive fournie à la charge [4, 5, 26].

Les tensions de réseau triphasées sont représentées par les équations suivantes:

$$\begin{cases} v_{ga} = v_{\max} \cos(\omega t) \\ v_{gb} = v_{\max} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_{gc} = v_{\max} \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \dots\dots\dots(\text{III.26})$$

Les tensions dans le référentiel d - q sont représentées par les équations suivantes :

$$\begin{cases} v_{gd} = v_{id} - R_g i_{gd} - L_g \frac{di_{gd}}{dt} + \omega_g L_g i_{gq} \\ v_{gq} = v_{iq} - R_g i_{gq} - L_g \frac{di_{gq}}{dt} - \omega_g L_g i_{gd} \end{cases} \dots\dots\dots(\text{III.27})$$

Les équations de puissance dans le référentiel synchrone sont données par [25] :

$$\begin{cases} P_g = \frac{3}{2} (v_{dg} i_{dg} + v_{qg} i_{qg}) \\ Q_g = \frac{3}{2} (v_{dg} i_{dg} - v_{qg} i_{qg}) \end{cases} \dots\dots\dots(\text{III.28})$$

Les puissances active et réactive peuvent être obtenues après avoir orienté le référentiel le long de la tension du réseau à partir des équations suivantes :

$$\begin{cases} P_g = \frac{3}{2} v_{dg} i_{dg} \\ Q_g = \frac{3}{2} v_{dg} i_{qg} \end{cases} \dots\dots\dots(\text{III.29})$$

Les courants de réseau dans le référentiel d - q peuvent être exprimés comme suit :

$$\begin{cases} \frac{di_{gd}}{dt} = \frac{v_{id}}{L_g} - \frac{R_g}{L_g} i_{gd} + \omega_g i_{gq} - \frac{v_{gd}}{L_g} \\ \frac{di_{gq}}{dt} = \frac{v_{iq}}{L_g} - \frac{R_g}{L_g} i_{gq} - \omega_g i_{gd} - \frac{v_{gq}}{L_g} \end{cases} \dots\dots\dots(\text{III.30})$$

Le module de la tension et du courant total du réseau est établi par :

$$\begin{cases} |v_g| = \sqrt{(v_{gd})^2 + (v_{gq})^2} \\ |i_g| = \sqrt{(i_{gd})^2 + (i_{gq})^2} \end{cases} \dots\dots\dots(\text{III.31})$$

Les puissances active et réactive dans le référentiel d - q sont données par :

$$\begin{cases} P_g = \frac{3}{2} (v_{gd} i_{gd}) = \frac{3}{2} (|v_g| |i_{gd}|) \\ Q_g = \frac{3}{2} (-v_{gd} i_{gq}) = -\frac{3}{2} (|v_g| |i_{gq}|) \end{cases} \dots\dots\dots(\text{III.32})$$

La stratégie de contrôle appliquée au convertisseur coté réseau repose sur la réalisation :

$$\begin{cases} v_{gq} = 0 \\ v_{gd} = |v_g| \end{cases} \dots\dots\dots(III.33)$$

Les équations des puissances deviennent :

$$\begin{cases} P_g = \frac{3}{2}(v_{gd}i_{gd} + v_{gq}i_{gq}) \\ Q_g = \frac{3}{2}(v_{gq}i_{gd} - v_{gd}i_{gq}) \end{cases} \dots\dots\dots(III.34)$$

La dynamique des puissances active et réactive est directement liée aux composantes du courant. Les erreurs quadratures du courant de réseau définies par les expressions suivantes :

$$\begin{cases} e_{gd} = i_{gd}^* - i_{gd} \\ e_{gq} = i_{gq}^* - i_{gq} \end{cases} \dots\dots\dots(III.34)$$

La dynamique d'erreur sera calculée comme suit :

$$\begin{cases} \dot{e}_{gd} = -\dot{i}_{gd} \\ \dot{e}_{gq} = -\dot{i}_{gq} \end{cases} \dots\dots\dots(III.35)$$

La fonction de Lyapunov en fonction des erreurs des courants de réseau calculées est déterminée comme suit :

$$V = \frac{1}{2}(e_{gd}^2 + e_{gq}^2) \dots\dots\dots(III.36)$$

La dynamique de la fonction de Lyapunov [28] peut être dérivée comme suit :

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -K_{gd}e_{gd}^2 - K_{gq}e_{gq}^2 \\ & + e_{gd} \left(\frac{v_{id}}{L_g} - \frac{R_g}{L_g}i_{gd} + \omega_g i_{gq} - \frac{v_{gd}}{L_g} + K_{gd}e_{gd} \right) \dots\dots\dots(III.37) \\ & + e_{gq} \left(\frac{v_{iq}}{L_g} - \frac{R_g}{L_g}i_{gq} - \omega_g i_{gd} - \frac{v_{gq}}{L_g} + K_{gq}e_{gq} \right) \end{aligned}$$

Pour obtenir la stabilité grâce à cette fonction de Lyapunov [26] , une valeur positive doit être sélectionnée pour les gains K_{gd} et K_{gq} , et la fonction dérivée doit être négative. Par conséquent, nous devons choisir les tensions de référence comme suit :

$$\begin{cases} v_{id}^* = R_g i_{gd} - \omega_g L_g i_{gq} - L_g K_{gd} e_{gd} + v_{gd} \\ v_{iq}^* = R_g i_{gq} + \omega_g L_g i_{gd} - L_g K_{gq} e_{gq} + v_{gq} \end{cases} \dots\dots\dots(III.38)$$

Le courant i_{gq}^* peut être obtenu à partir de la relation suivante :

$$i_{gq}^* = -\frac{2Q_g^*}{3v_{gq}} \dots\dots\dots(III.39)$$

Si la puissance réactive de référence est forcée à zéro $Q_g^* = 0$, le système fonctionnera avec un facteur de puissance unitaire. Le calcul du courant de référence continu i_{gd}^* est obtenu par la régulation de la tension du bus continu. La tension du circuit intermédiaire est régulée à la valeur de référence v_{dc}^* , et si les pertes du convertisseur sont négligeables, la puissance active transférée sera définie comme suit :

$$P_g = \frac{3}{2}(v_{gd}i_{gd}) = v_{dc}i_{dc} \dots\dots\dots(III.40)$$

Ainsi, le courant i_{gd}^* est obtenu à partir de (équation (III.55)) :

$$i_{gd}^* = \frac{2P_g^*}{3v_{gd}} \dots\dots\dots(III.41)$$

Pour contrôler la tension du bus continu V_{dc} , un régulateur doit être mis en place pour maintenir cette tension constante quel que soit le débit de courant sur le condensateur [25, 27]. L'équation du bus continu peut s'écrire comme suit :

$$P_c = cv_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} = P_g - P_r \dots\dots\dots(III.42)$$

Pour contrôler la tension continue, nous contrôlons P_c dans le condensateur en ajustant la puissance P_g à l'aide d'un contrôleur PI conventionnel.

III.7.2 Résultats de simulation

A partir de la figure III.20, on constate que la tension du bus continu suit convenablement sa référence dans l'intervalle de simulation avec un régime transitoire très rapide et sans dépassement même en présence des contraintes de fonctionnement. Comme on peut le voir sur la même figure, la tension et le courant à la sortie du redresseur, ces grandeurs sont maintenues dans ses valeurs nominales.

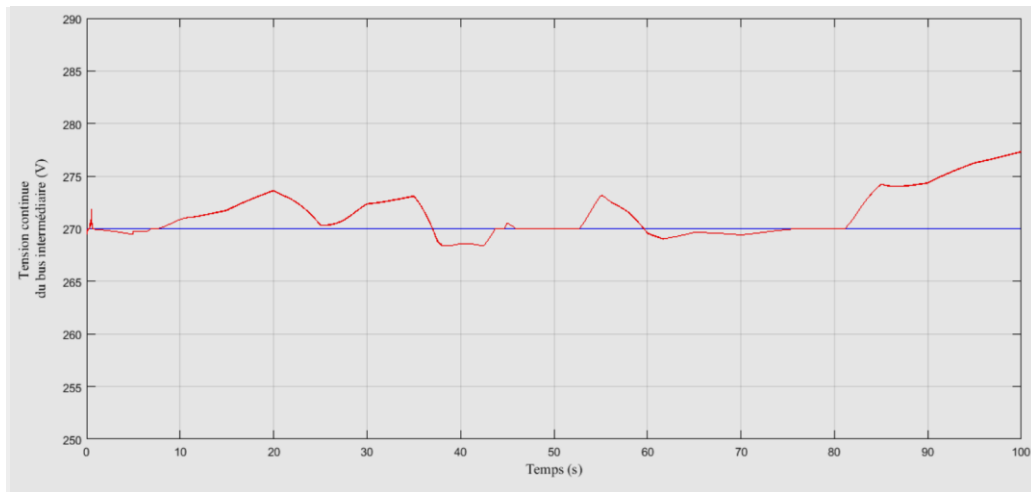


Figure III.20: Tension du bus continu, tension et courant à la sortie

Sur la même figure on constate la tension du circuit intermédiaire est bien maintenue constante à la valeur spécifiée (270V) ce qui constitue un avantage important et prouve l'efficacité du schéma proposé. Cela nous a permis d'égaliser les différentes tensions de liaison continue d'entrée de l'onduleur à plusieurs niveaux.

III.8 Charge :

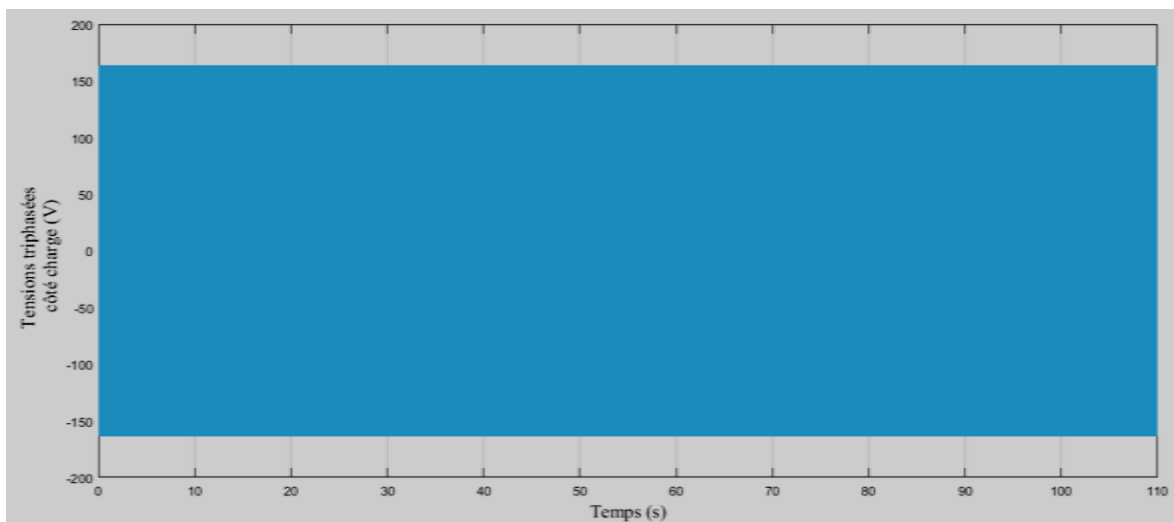


Figure III.21: Tensions triphasées de la charge

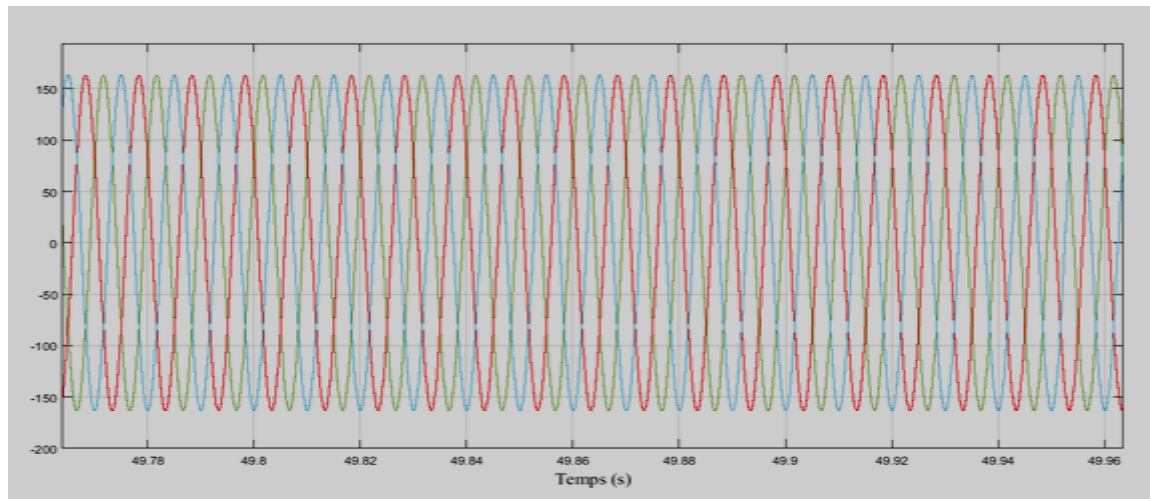


Figure III.22 : Zoom des tensions triphasées de la charge

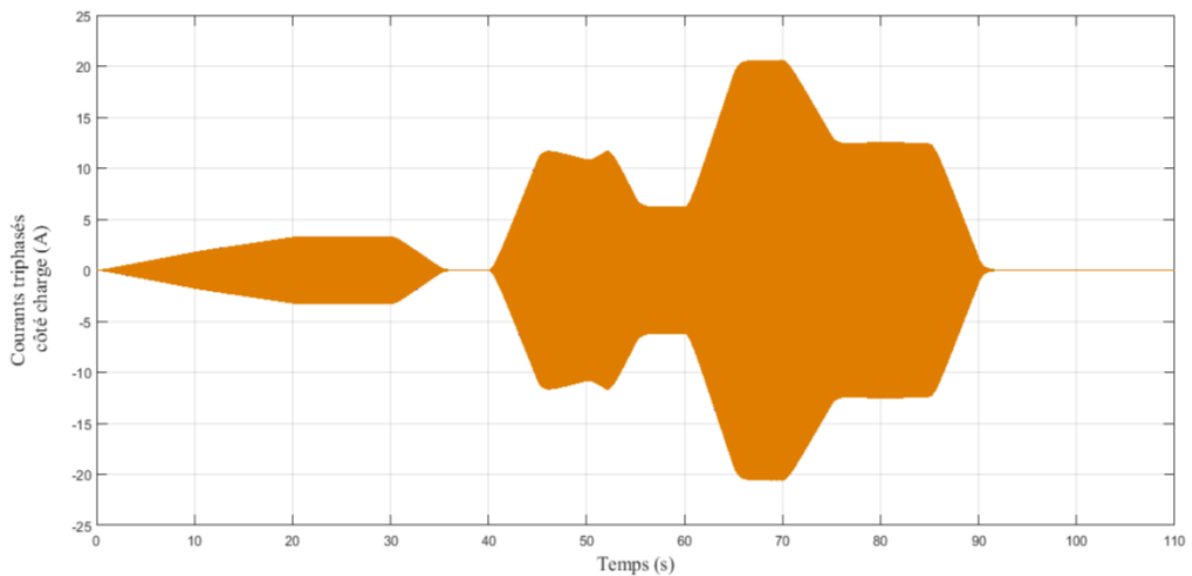


Figure III.23: courants triphasés de la charge

Les figures III.21, III.22 , III.23, montrent le courant et la tension de la charge avec leur zoom, elles sont purement sinusoïdales ce qui montre l'efficacité de la stratégie de contrôle appliquée au convertisseur qui donne une meilleure qualité d'énergie à la charge. Sur la même figure, on observe la tension efficace de la charge. Elle a une valeur proche de 155 V.

III.9 Système de supervision et de gestion

III.9.1 Schéma de supervision du SEH

Le module de supervision représente la partie la plus importante du système global proposé puisqu'il supervise les modes de fonctionnement tout en gardant une transition lissée

entre ces derniers, d'autre part, il gère l'échange de puissance entre les différents composants du système multi-sources, stockage et le réseau/charge [26]. En outre, le superviseur assure le fonctionnement optimal des différents composants du système hybride par action sur leurs convertisseurs associés (les contrôleurs locaux) comme le montre la figure III.24

L'algorithme proposé est conçu de telle sorte à garder un équilibre entre le système hybride et la charge/réseau pour tout échange de puissance ou scénario possible, dans le but d'augmenter l'efficacité énergétique du système hybride, sa fiabilité ainsi son taux de pénétration.

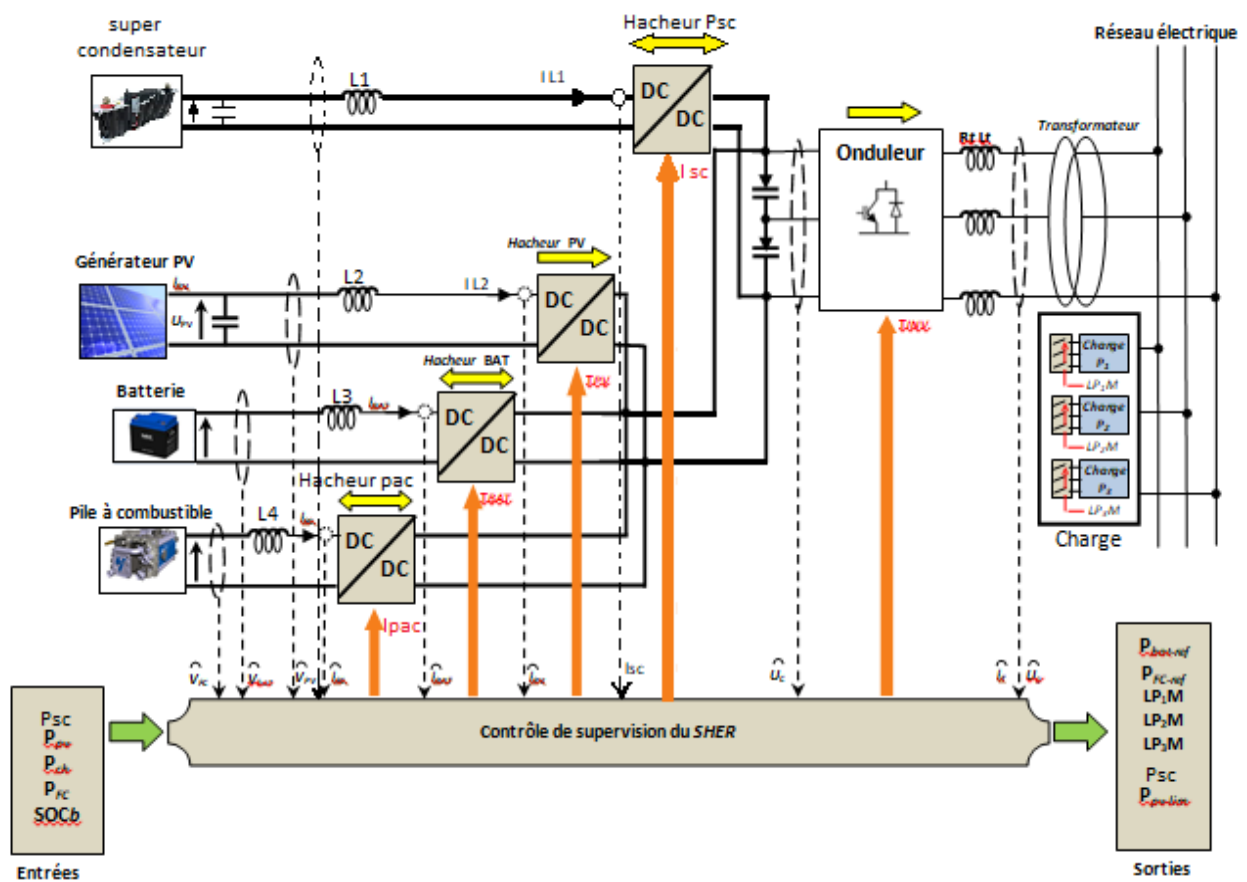


Figure III.24 : Schéma de supervision du SEH proposé

La supervision du système global peut se résumer comme suit [27]:

- 1- Initialement, le système de stockage est chargé ;
- 2- Selon l'état de charge global du système de stockage, le profil de la charge, la puissance produite PV/pile à combustible, le superviseur dirige le système global vers un mode de fonctionnement bien déterminé ;
- 3- Une flexibilité entre les différents modes de fonctionnement doit être assurée ;

- 4- Le système global proposé peut fonctionner en mode isolé ainsi en mode connecté ;
- 5- Le contrôleur sera capable de superviser une source d'énergie renouvelable seule ou des systèmes multi-sources ;
- 6- Si le système multi-stockage est complètement chargé (SOC atteint son Max), il sera déconnecté et le surplus d'énergie produite par le système multi-sources est injecté vers le réseau. Ce surplus doit être limité d'une façon équilibrée entre les unités de production en cas où la charge impose une limite ;
- 7- Dans le cas de déficit de production et le système de stockage en état de décharge, les charges seront déconnectées selon l'ordre de priorité. Si le système de stockage continu à se décharger jusqu'au minimum, ce dernier sera déconnecté afin d'éviter une décharge profonde et seule la charge principale (avec haute priorité) sera soutenue par le réseau ;

III.9.2 Organigramme de gestion

La gestion d'énergie entre les différentes sources constituant notre système hybride : PV, pile à combustible, batterie, super condensateur est assurée par une technique bien déterminée. Elle a été conçue en tenant compte de tous les scénarios de fonctionnement de l'ensemble SEH autonome mentionnés ci-dessus. Le principe de fonctionnement de la stratégie de gestion de l'énergie proposé est représenté par l'organigramme de la figure III.25.

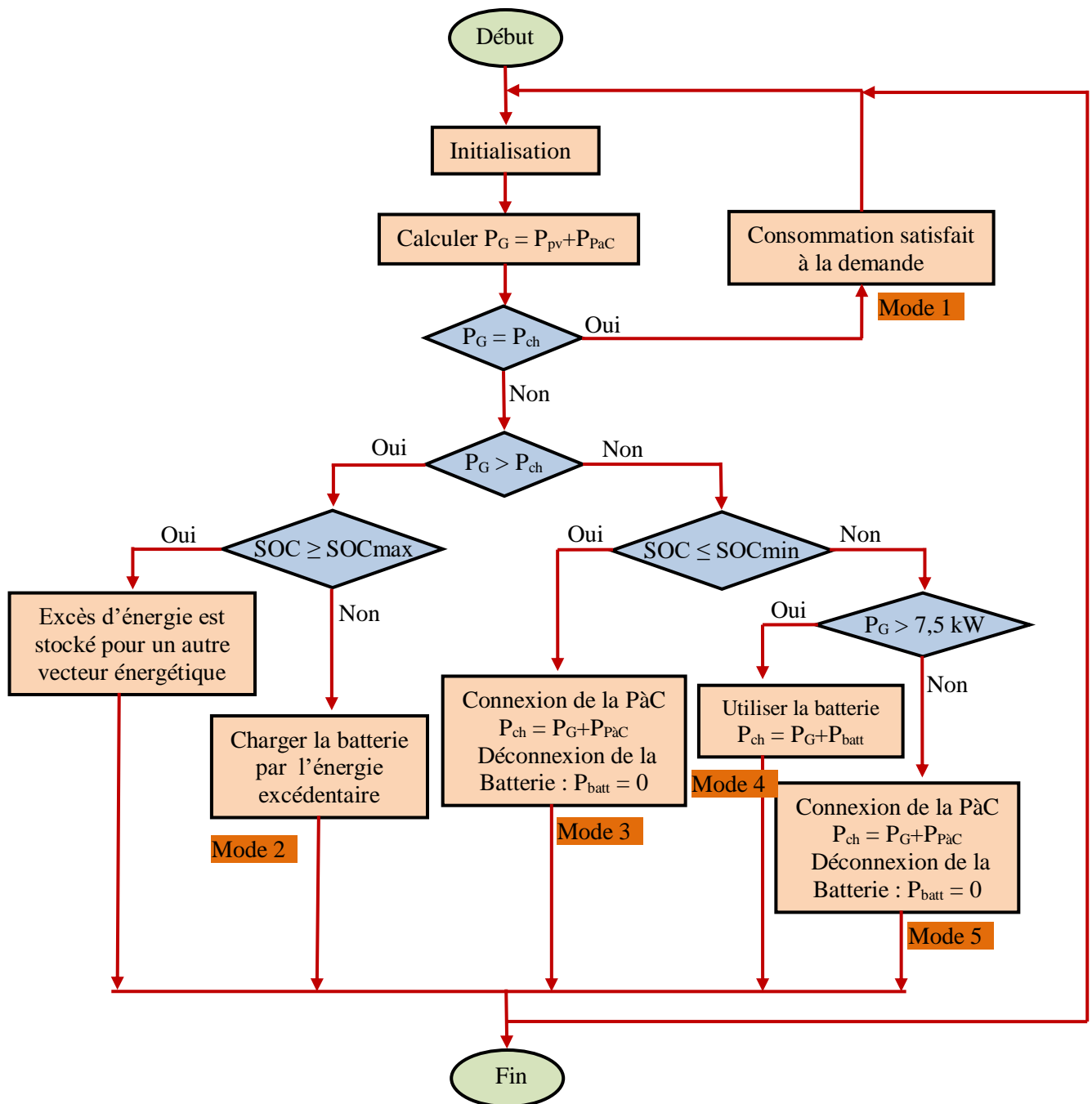


Figure III.25 : Organigramme de supervision de gestion

Nous commençons par l'initialisation des :

- ❖ Paramètre des différents sous-systèmes,
- ❖ Données climatiques : la température et l'éclairement,

Pour le système autonome intégré PV/pile à combustible/batterie/pile à combustible, la source d'énergie renouvelable photovoltaïque est désignée comme source d'alimentation principale, tandis que le composant de pile à combustible est installé comme source d'énergie de secours. La

stratégie de gestion de l'énergie adoptée dans la recherche se concentre sur l'énergie produite par la source d'énergie renouvelable photovoltaïque et sur l'état de charge de la batterie et la super condensateur de stockage.

III.9.3 Modes et scénarios du fonctionnement du système hybride

1. Mode 1 : Etat de charge constante et alimentation d'un autre vecteur énergétique

Ce mode est illustré sur la figure III.25, il y a une égalité entre la puissance totale produite par les sources principales et la puissance requise par la charge (production $P_G =$ consommation P_{ch}). Par effet, l'état de stockage reste constant (batterie au repos), à condition de supposer que le phénomène d'auto- décharge est négligé. Les unités de production PV/PAC produisent de l'énergie électrique suivant les conditions climatiques en se fonctionnant en mode MPPT. Le système hybride satisfait la demande.

2. Mode 2 : Charge le système de stockage

Le système passe en mode 2, comme il est indiqué sur la figure III.25, lorsque la puissance globale générée par le panneau PV et La pile à combustible est supérieur à la puissance demandée pour satisfaire la charge ($P_G > P_{ch}$). Cela signifie que la puissance générée par les sources principales disponibles (PV et PAC) est supérieure à la demande de la charge et il y a suffisamment d'énergie pour alimenter la charge et stocker l'énergie excédentaire dans la batterie et la super condensateur jusqu'à SOC max. Dans ce mode, la puissance suffisante disponible à partir du panneau PV est utilisée pour satisfaire la charge et la puissance de la pile à combustible est alimentée à l'aide d'une commande adéquate. L'énergie excédentaire de PAC peut être utilisée pour charger la batterie ou la super condensateur. Il est nécessaire de limiter la puissance produite en balance entre le PV et la PAC. Il se peut cependant, un moment que la quantité de puissance demandée par la charge ne puisse pas être fournie par le mode 2, alors le programme détermine quel élément (batteries ou super condensateur) est prioritaire pour fournir de l'énergie.

3. Mode 3 : Très faible état de batterie et sollicitation de la super condensateur

Pour ce mode qui est affiché sur la figure III.25, la puissance combinée des panneaux photovoltaïques et de PAC n'est pas suffisante pour alimenter la charge ($P_G < P_{ch}$) ainsi que la batterie est à son état de charge minimum, ce qui implique qu'elle ne peut pas être utilisée pour satisfaire la pénurie de puissance requise, dans ce cas, la super condensateur sera utilisé pour couvrir l'énergie manquante et répondre à la demande

Si la puissance produite par les SEH et la batterie ne sont pas suffisantes pour fournir de l'énergie à la charge, le déficit cette puissance sera compensée à l'aide de la super condensateur [27],

4. Mode 4 : Décharge de la batterie à un niveau très bas

Ce mode qui est présenté sur la figure III.25, est survenu quand la différence entre la puissance générée et la puissance demandée, est inférieure à zéro ($P_G - P_{ch} < 0$), cela indique que l'énergie produite par la source renouvelable n'est pas suffisante pour faire alimenter la charge. Dans ce cas, la batterie intervient pour fournir l'énergie nécessaire afin de couvrir la demande de la charge jusqu'à sa limite inférieure SOCmin. En effet, la super condensateur est déconnectée (source de secours). Pour éviter une décharge rapide et conserver l'équilibre du système hybride, l'algorithme de supervision déconnecte la charge attribuée à la plus faible priorité.

Si le SEH ne peut pas répondre à la puissance requise pour la Charge initiale, des batteries seront utilisées pour couvrir la demande de charge jusqu'à ce qu'elles soient réduites à leur niveau minimum $E_{B_{min}}$ [10]. La Charge secondaire CHS non satisfaite sera reportée au moment de la génération de surplus

5. Mode 5 : puissance générée, limitée et sollicitation de la super condensateur

Pour ce qui concerne le mode 5 illustré sur la figure III.25 Si la puissance combinée des panneaux photovoltaïques et de PAC n'est pas suffisante pour alimenter la charge ($P_G < P_{ch}$) en plus $P_G < 7,5$ Kw et le SOC de la batterie est supérieur à son état de charge minimum dans ce cas la batterie est déconnectée et LA super condensateur sera utilisé où elle doit compensée l'énergie fournie à la charge.

III.9.4 Résultats de simulation et de gestion de notre système hybride

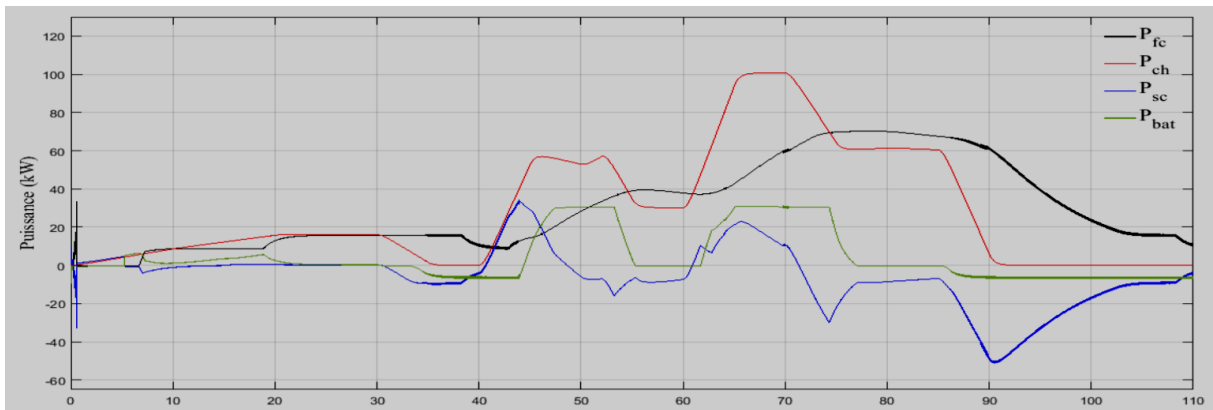


Figure III.26: Gestion de puissance du système hybride

L'échange de puissance se résume par l'ensemble de figures III.26 tel que: la puissance de charge, la puissance de la pile à combustible la puissance du super condensateur et la puissance de la batterie, sont présentées. Dans cette simulation, nous supposons que la charge demande une puissance variant pour les différents modes de fonctionnement. Les résultats peuvent être analysés par discussions comme suit:

❖ $t \in [0 \text{ s} - 5 \text{ s}] :$

les courbes de puissance de la charge et du super condensateur augmentent, ce qui signifie qu'ils fournissent de l'énergie pendant cette période. Les autres courbes, celle de la pile à combustible et de la batterie, sont nulles, ce qui suggère qu'elles ne fournissent pas de puissance à ce moment-là

❖ $t \in [5 \text{ s} - 11 \text{ s}] :$

il semble que les courbes de puissance de la charge et du full celle augmentent de manière significative. Cela indique que la puissance fournie par la charge et la pile à combustible augmente progressivement au fil du temps.

En ce qui concerne les courbes de puissance de la batterie et de la super condensateur, elles présentent une variation plus faible par rapport aux courbes de charge et de super condensateur. Cela suggère que la puissance fournie par la batterie et super condensateur reste relativement constante ou ne varie que légèrement pendant cette période.

❖ $t \in [11 \text{ s} - 20\text{s}] :$

la puissance de charge présente des variations relativement importantes. La charge absorbe différentes quantités de puissance au fil du temps, ce qui se traduit par des fluctuations dans la courbe de puissance de charge

la puissance de charge fournie reste constante, elle absorbe une puissance constante sans variation significative.

la puissance fournie par la batterie reste relativement constante avec de légères variations. La batterie fournit une puissance constante ou presque constante, mais il peut y avoir de légers changements en fonction des besoins de charge.

La courbe du super condensateur est nulle : Cela signifie que le super condensateur ne fournit aucune puissance .Il peut être inutilisé ou déchargé pendant cette période spécifique

❖ $t \in [20 \text{ s} - 30\text{s}] :$

les courbes de charge et de "full celle" sont confondues, ce qui suggère qu'elles ont des valeurs similaires. Cela indique que la puissance fournie par la source PAC spécifiée et la puissance demandée par la charge sont équivalentes pendant cette période.

En outre, les courbes du super condensateur et de la batterie sont nulles, ce qui signifie qu'elles ne fournissent pas de puissance pendant cet intervalle de temps. Cela le système est met en mode 1 $P_g = P_{ch}$.

❖ $t \in [30 \text{ s} - 40\text{s}] :$

la courbe de "full celle" reste constante, ce qui indique que la puissance fournie par la source d'énergie spécifiée (peut-être une batterie ou une autre source) reste constante pendant cette période.

D'autre part, la courbe de charge diminue et devient nulle, ce qui signifie que la puissance demandée par la charge diminue progressivement jusqu'à atteindre zéro.

En ce qui concerne les courbes de l'ensemble de stockage (batterie et supercondensateur), elles diminuent et deviennent inférieures à zéro. Cette observation suggère que la batterie et le supercondensateur sont en train d'être chargés pendant cet intervalle de temps.

Sur la base de ces informations, on peut conclure que le système est en mode 2 pendant cette période $P_G > P_{ch}$

❖ $t \in [40 \text{ s} - 46\text{s}] :$

La courbe de charge est croissante et se synchronise rapidement avec la courbe du super condensateur. Cela indique que la puissance demandée par la charge augmente progressivement et est rapidement fournie par le super condensateur. La charge absorbe de plus en plus de puissance au fil du temps, et le super condensateur répond rapidement à cette demande en fournissant la puissance nécessaire.

la puissance fournie par la source d'énergie PAC diminue globalement, mais cette diminution est lente. La source d'énergie fournit encore de la puissance, bien que progressivement réduite.

la batterie fournit de la puissance négative pendant une partie de cet intervalle, ce qui signifie qu'elle est en train d'être chargée. Cependant, à certains moments, la batterie commence à fournir de la puissance positive, ce qui indique qu'elle est utilisée pour alimenter la charge.

Sur la base de ces observations, on peut conclure que le système est en mode 3 pendant cet intervalle. Le mode 3 ($P_G < P_{ch}$) peut être défini comme une configuration où la charge est alimentée à la fois par le super condensateur et la batterie, tandis que la source d'énergie principale diminue lentement mais continue de fournir de la puissance

❖ $t \in [46 \text{ s} - 53\text{s}] :$

La puissance fournie par la PAC augmente lentement pendant cette période.

La puissance demandée par la charge reste globalement constante et est fournie principalement par la batterie pendant cette période. La charge absorbe une puissance constante ou presque constante, ce qui se reflète par la stabilité de la courbe de charge. La batterie fournit la puissance

nécessaire pour alimenter la charge, ce qui explique la synchronisation des courbes de charge et de batterie.

La puissance fournie par le super condensateur diminue et décroît pendant cet intervalle de temps. Il peut y avoir une réduction de la puissance fournie par le super condensateur en raison d'une diminution de sa charge ou de son épuisement.

Sur la base de ces observations, il est possible de conclure que le système peut être en mode 4 pendant cette période. Le mode 4 ($P_G - P_{ch} < 0$) peut être défini comme une configuration où la charge est principalement alimentée par la batterie, tandis que la source d'énergie principale (full celle) continue de fournir de la puissance mais à un rythme lent. Le super condensateur fournit une puissance décroissante ou peut être moins utilisé pendant cette période

❖ $t \in [53 \text{ s} - 60\text{s}] :$

la puissance fournie par la pile a combustible atteint un niveau constant pendant cette période.

Les courbes de charge et de batterie décroissent : Cela suggère que la puissance demandée par la charge diminue progressivement, et la batterie fournit la puissance nécessaire pour alimenter la charge. La courbe de charge reflète cette diminution de la demande de puissance de la charge, tandis que la courbe de batterie diminue également car la batterie fournit moins de puissance au fur et à mesure que la demande diminue.

le super condensateur continue de fournir une puissance négative pendant cet intervalle de temps. Cela peut signifier qu'il est en train d'être chargé ou qu'il fournit une puissance négative pour soutenir la charge ou le système.

Sur la base de ces observations, il est possible de conclure que le système peut être en mode 5 pendant cette période. Le mode 5 ($P_G < P_{ch}$) peut être défini comme une configuration où la charge est principalement alimentée par la batterie, tandis que la source d'énergie principale (full celle) fournit une puissance constante. Le super condensateur peut être en cours de charge ou peut jouer un rôle de soutien dans la fourniture de puissance négative.

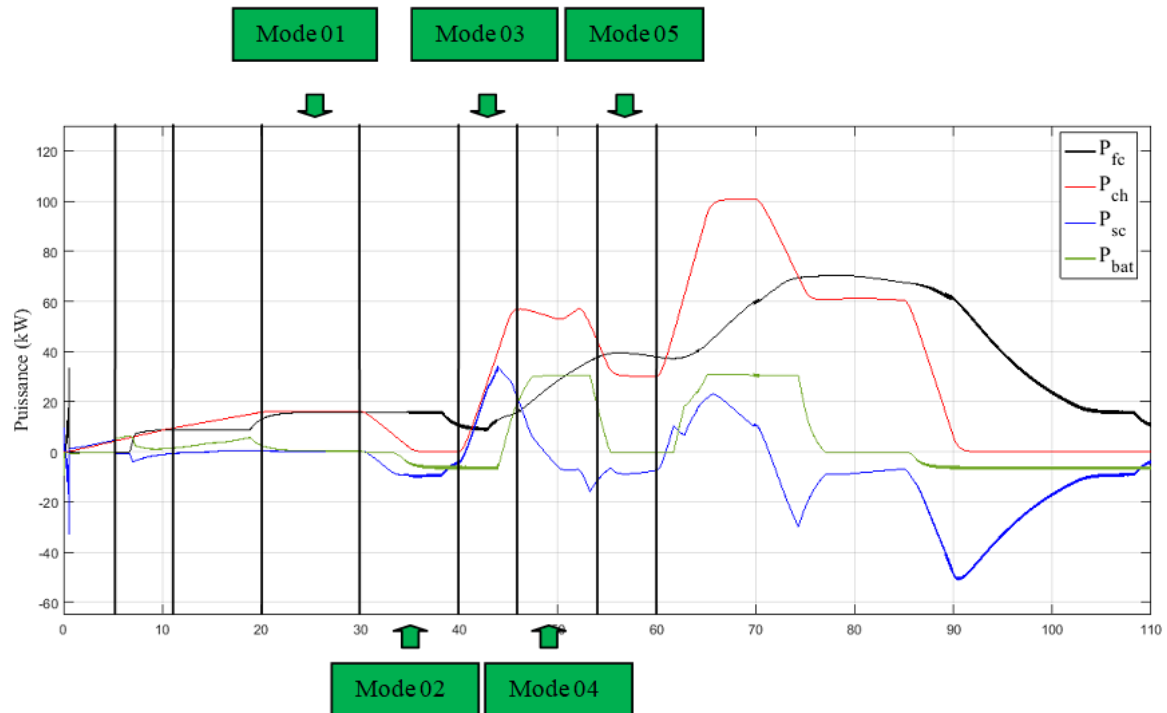


Figure III.27 : les différents modes de gestion de système hybride

Les résultats obtenus avec la structure proposée sont très satisfaisants. Ils nous ont permis de valider l'étude théorique présentée. D'une part, les performances de réglage dans l'ensemble de constituants du système hybride,

III.10 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons simulé le comportement du système complet de production d'énergie SEH qui contient la pile PEM, GPV ainsi que le système de stockage représenté par la batterie et les super condensateurs. Nous avons conclu de la simulation qu'il est possible d'utiliser un système hybride en utilisant une commande pour gérer chaque composant du système selon les besoins spécifiques. Cette approche permet de maximiser l'efficacité et d'optimiser l'utilisation des différentes sources d'énergie disponibles, Nous avons conclu que la gestion de l'énergie dans un système hybride est essentielle pour assurer une utilisation optimale des différentes sources d'énergie. Cela implique de surveiller en temps réel la production et la demande d'énergie, et de prendre des décisions intelligentes pour acheminer l'énergie vers les composants appropriés du système. Les algorithmes de gestion de l'énergie peuvent être utilisés pour optimiser la consommation, minimiser les pertes d'énergie et garantir un fonctionnement stable du système hybride.

CONCLUSION GENERALE



Conclusion générale

Les systèmes d'énergie hybrides sont considérés comme les plus prometteurs pour l'utilisation des énergies renouvelables. En Afrique, où le potentiel énergétique solaire est élevé, il est crucial de promouvoir la substitution systématique des sources d'énergie conventionnelles qui deviennent de plus en plus contraignantes en termes de coûts d'exploitation et de fonctionnement [4]. La ressource mondiale en énergie photovoltaïque est extrêmement abondante et peut contribuer de manière significative à la fourniture d'électricité à l'échelle mondiale.

Les travaux présentés dans ce manuscrit se concentrent sur la production d'électricité à partir d'un système hybride. L'objectif était de maintenir un niveau élevé de fiabilité avec des coûts minimaux grâce à une conception optimale du système hybride pour une charge donnée et une probabilité de perte d'énergie spécifiée, en prenant en compte un coût minimal du système.

La production d'électricité par ce système hybride, combinée à un système de stockage, répond efficacement aux défis posés par le contexte énergétique actuel. En Algérie, grâce à la nature du terrain et à la durée de l'ensoleillement, le pays est devenu un modèle dans la production d'énergies renouvelables.

L'étude du système hybride et l'analyse des résultats démontrent son bon fonctionnement, qui est suffisant pour répondre aux besoins énergétiques de la charge. L'énergie produite est disponible à toute heure de la journée, car les deux sources d'énergie fonctionnent de manière alternative : si l'une est absente, les autres peuvent la compenser. Ce système hybride peut être utilisé pour alimenter des sites isolés.

Notre travail à été structuré en trois parties:

Le premier chapitre de ce travail aborde une étude générale des différentes composantes du système hybride, comprenant des panneaux photovoltaïques, une pile à combustible, des batteries de stockage et les convertisseurs statiques

Le deuxième chapitre est dédié à la modélisation du système hybride, qui est composé d'un générateur photovoltaïque, d'une pile à combustible, de régulateurs de tension et d'une batterie et un super condensateur de stockage. Cette modélisation facilite la simulation présentée dans le dernier chapitre.

Dans le dernier chapitre, nous avons effectué la simulation de notre système hybride. Nous avons d'abord simulé le système de panneaux photovoltaïques, le système de pile à combustible puis le système de stockage (batterie). Finalement, nous avons simulé l'ensemble du système étudié.

En conclusion de cette étude, il est important de souligner que le système hybride présente certains inconvénients. Nous suggérons d'ajouter une gestion appropriée pour améliorer ses performances et réduire ses limitations.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES



- [1] I. Vechiu, « modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome », Thèse de doctorat, Université du Havre, 2005.
- [2] <https://www.edf.fr/groupe-edf>, 21/05/2023, 16h :30.
- [3] Saad Motahhir, Abdelaziz El Ghzizal, Aziz Derouich , « Modélisation et commande d'un panneau photovoltaïque dans l'environnement PSIM » hal-01351493f, Submitted on 6 Apr 2020
- [4] A. Labouret, P.cumulonel, J-P.Braun, « Cellules Solaires Les Bases de L'énergie Photovoltaïque », Dunod, Paris 2001
- [5] http://www.ciele.org/filieres/solaire_photovoltaïque.htm.
- [6] A. Behalil mohcène, b. Khayreddine, «étude et comparaison des différentes configurations des panneaux photovoltaïques sous l'effet de l'ombrage partiel », thèse master, université badji mokhtar Annaba, 2018/2019
- [7] Yacine KESSAI. «Refroidissement par la géothermie des eaux d'irrigation échangeur eau/sol forme serpentin». Mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra. 2020
- [8] Dd magazine le développement durable en pratique
- [9] Olivier Gergaud, «Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur», Thèse de doctorat, École normale supérieure de Cachan, 2009
- [10] <http://www.economie-dennergie.wikibis.com>
- [11] B. Lakhdar, M. Ammar «Étude d'un système photovoltaïque optimisé par une technique MPPT intelligente (neurone-floue) ANFIS. Etude d'un système photovoltaïque optimisé par une technique MPPT intelligente (neurone-floue) ANFIS». Thèse MASTER, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 2020/2021
- [12] Planète énergies (Toutes les énergies en clair et en live), « La cellule photovoltaïque : comment ça marche ? », <https://www.planete-energies.com>, consulté le 20 /06 /2021
- [13] A.Lamiss, D.Sara, «ELABORATION D'UN CODE DE CALCUL POUR L'ETUDE DES CELLULES SOLAIRES PHOTOVOLTAÏQUES A HAUT RENDEMENT APPLICATION A LA CELLULE A L'ARSENIURE DE GALLIUM (GAAS) », thèse master, UNIVERSITE Larbi BEN M'HIDI, 2021
- [14] C.Bennour. «Simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation». Thèse de doctorat. Université de Biskra-Mohamed Khider. 2012
- [15] M. KASDI Rafik, M. HANTAT Brahim «Commande d'une génératrice asynchrone intégrée dans un système éolien connectée au réseau» Mémoire de master ,2011/2012
- [16] A. Riadh, A.Mohieddine, «Identification des paramètres d'un module photovoltaïque », Mémoire de master, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 2021/2022
- [17] A.ngel, Cid Pastor«Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques». INSA de Toulouse, 2006
- [18] B.Bilal, H.Ibtissem Karima , «Modélisation d'un Capteur Photovoltaïque /Thermique» these master, Université Kasdi Merbah d'Ouargla , 2018

- [20] <https://www.futura-sciences.com/maison/dossiers/maison-electricite-solaire-energie-rayonnante-1225/page/12/> Consulté le 23 avril 2022
- [21] A.Mohammed Brahim , A. Cheikh Bachir, «optimisation de la puissance d'un générateur Photovoltaïque» , mémoire d'ingénieur en électrotechnique, Université D'oum El Bouaghi 2009.
- [22] S. khenfous, A. Kaabeche ,S. Diaf , «Optimisation du dimensionnement d'un système hybride photovoltaïque/éolien par des méthodes méta heuristiques», Université M'Hamed Bougara, Boumerdès, 2017
- [23] Zaida Assani Dahouénon «Modèle d'électrification rurale pour localités de moins de 500 habitants au Sénégal», Ministère de l'énergie de Mine –Sénégal, composante électrification rurale. Auteur :. Juillet 2005-janvier 2006
- [24] brahim abdallah brahim «étude des différentes configurations des systèmes d'énergie hybrides pv/diesel et de leur impact sur le coût de production d'électricité», thèse master, centre commun de recherche énergie et habitat durable, 21/06/2013
- [25] «Commande des systèmes électrique Projet de Fin de cycle».Université Abderrahmane Mira-Bejaia
- [26] Ludmil Stoyanov, «Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables», Université Pascal Paoli Français. , 2011.
- [27] A.Bouharchoche, « Etude et Commande d'un Système de Production Hybride Eolien-photovoltaïque » , Thèse de Magister, Ecole Militaire Polytechnique,2013
- [28] E.Mamadou adji doundo, « Amélioration de la production électrique d'une centrale thermique a mi-temps par injection solaire photovoltaïque : cas de Tamayo au Niger », these Master d'ingénierie, Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, Burkina Faso, 2017
- [29] Tiar Mourad, « commande optimale d'un système de génération photovoltaïque hybride», soutenue le 10-10-2011.
- [30] K.BOUCOUICHA, «modélisation multispectrale des image satellitaire,» Université des sciences et de la technologie D'oran, memoire de doctorat, Algérie, 2017.
- [31] R. SEBAA, Y. BENAMMAR, «Etude de faisabilité et dimensionnement d'un système hybride à base d'énergies renouvelables», Projet fin d'étude, Ecole supérieur en science appliquée de Tlemcen, Algérie, 2021.
- [32] L. Stoyanov, G. Notton et V. Lazarov, « Optimisation des systèmes multi-sources de production d'électricité à énergies renouvelables », Revue des Energies Renouvelables
- [33] BORN I Abdelhalim, « Etude et optimisation d'un multi système hybride de conversion d'énergie électrique », Thèse Doctorat en sciences en elctrotechnique, Modélisation des machines électriques, Université Constantine 1, 2015.
- [34] ASKRI Abdallah, SOUDA El Mekki, «Étude de Défauts et Défaillances sur les Panneaux Photovoltaïques et leur Maintenance», Université Echahid Hamma Lakhdar- El Oued, 2021

- [35] bessedik boubaker, Contribution à l'étude des systèmes hybrides: PV/Pile à Combustible/Super condensateur, thèse doctorat, université Mohamed Boudiaf des sciences exactes Oran ,2020
- [36] <https://picbleu.fr/>
- [37] J.Lachaize, « Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2004
- [38] HATTI Mustapha , «Contribution à l'Étude des Systèmes Hybrides Photovoltaïque / Pile à Combustible », Thèse e Doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran "Mohamed Boudiaf",2010
- [39] http://help.adobe.com/en_US/Acrobat/9.0/Standard/WS981E9B4B-F8E4-4511-ADE4-2D7380472979.html THEM : Environnement et progrès
- [40] <https://www.pngegg.com>
- [41] Idris SADLI, « MODELISATION PAR IMPEDANCE D'UNE PILE A COMBUSTIBLE PEM POUR UTILISATION EN ELECTRONIQUE DE PUISSANCE », these DOCTORAT, L'Institut National Polytechnique de Lorraine, 07 décembre 2006
- [42] M. Koulali, A.Berkani, K.Negadi, M.Mankour, A.Mezouar, « Sliding Fuzzy Controller for Energy Management of Residential Load by Multi-sources Power System Using Wind PV and Battery » , Journal Européen des Systèmes automatisés.
- [43] Z.Laid « Etude Technique d'un Système d'Energie Hybride Photovoltaïque-Eolien Hors Réseau » Thèse de Doctorat, Université Mentouri de Constantine, 2010.
- [44] L.Croci, « Gestion De L'Énergie dans un Système Multi-Sources Photovoltaïque et Eolien Avec Stockage Hybride Batteries/Supercondensateurs », Thèse de Doctorat, Université De Poitiers, 2013.
- [45] L.DEBBOU et D.MAGHRIBI «Commande d'un système hybride (photovoltaïque-éolienne) de production d'énergie» Mémoire d'ingénieur d'état. Université de Bejaïa, 2008.
- [46] Mohamed Ansoumane CAMARA, «Modélisation du stockage de l'énergie photovoltaïque par super condensateurs» Thèse de Doctorat, Université Paris-Est, Paris, France, 2011.
- [47] OURADJ Mohamed Elhadi, OUADAH Abderrahmane, «Etude des Scénarios Charge et Décharge d'une Batterie», these MASTER, UNIVERSITE DE DJILALI BOUNAAMA _ KHEMIS-MILIANA 2019/2020
- [48] Christiana HONSBERGET, Stuart BOWDEN, "Lead-acid Batteries," <https://www.pveducation.org>.
- [49] <https://slideplayer.fr/>

- [50] Mary BELLIS, "how a battery works," <https://www.thoughtco.com>, 2019.
- [51] <https://classnotes.org.in>
- [52] S. Butterbach , «Stockage d'énergie électrique par association de batteries au plomb et de supercondensateurs pour véhicule lourd» Thèse de doctorat, Université de technologie de Compiègne, septembre 2012.
- [53] <https://www.researchgate.net/>
- [54] GUALOUS, Hamid, GALLAY, Roland et BERTHON, «Utilisation des supercondensateurs pour le stockage de l'énergie embarquée». Revue de l'Electricité et de l'Electronique Alain. 2004
- [55] Jérôme LACHAIZE, « Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction», thèse doctorat, Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique Industrielle de l'ENSEEIH Unité Mixte de Recherche du CNRS n°5828, 20 septembre 2004
- [56] Samah SAKER «Modélisation et Contrôle du système, Pile à Combustible, Convertisseurs et Super condensateur» mémoire de Magister en Electrotechnique Université Mohamed Khider – Biskra, Faculté des Sciences et de la technologie, Année 2013.
- [57] brahimi samir «contribution à la commande d'un système pile à combustible /super condensateur .application au véhicule électrique», mémoire de fin d'étude d'ingénieur en electrotechnique, universite mouloud mammeri de tizi-ouzou
- [58] Ilyes TEGANI «Optimisation et contrôle d'un micro smart grid utilisant une pile à combustible, des super condensateurs, des batteries, une éolienne et une source photovoltaïque», Doctorat LMD en Génie Electrique, Université Mohamed Khider – Biskra, Année 04/06/2016.
- [59] H. Gualous, R. Gallay, A. Berthon «Utilisation des super-condensateurs pour le stockage de l'énergie embarquée : applications transport, Maxwell Technologies» S. A janvier 2004.
- [60] Ahmed NEFFATI, «Stratégies de gestion de l'énergie électrique d'un système multi-source : décision floue optimisée pour véhicule électrique hybride», these doctorat, université de toulouse
- [61] Benkassis Fatima zohra ,Sellaoui Assis, «Modélisation dynamique et analyse des convertisseurs DCDC pour applications en énergies renouvelables», these master, Université 8 Mai 1945 – Guelma, 03/10 /2020
- [62] <http://staff.univ-batna2.dz/>
- [63] BENNOURA ABDEL MADJID ,DJABRI KHALED , « Etude et simulation d'un variateur de vites d'une Machine à courant continu », thèse master, Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, 2017/2018.
- [64] M r ZEMOURI Azeddine, « Etudes expérimentales d'un convertisseur DC/DC contrôler»
- [65] BENSACI Wafa, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT », mémoire de master, Université de Ouargla, 2012.

- [66] Caisheng Wang; « MODELING AND CONTROL OF HYBRID, WIND/PV/FUEL CELL DISTRIBUTED GENERATION SYSTEMS” , MONTANA STATE UNIVERSITY Bozeman, Montana ,July 2006.,
- [67] SEVAN Geitmann « Énergies renouvelables & carburants alternatifs », article, hydrogeitverlage, août 2017.
- [68] RAUGEI Marco, «Le retour énergétique sur l'investissement énergétique (EROI) du photovoltaïque : méthodologie et comparaisons avec les cycles de vie des combustibles fossiles», Brookhaven National Laboratory, 2012.
- [69] A. Bentaillah, « étude expérimental et de simulation des performance d'une installation PV de faible puissance », mémoire de Magister en physique énergétique, Tlemcen, 1994.
- [70] B. BELABBAS, T. ALLAoui, M. TADJINE, M. DENAI, « Power management and control strategies for off- grid hybrid power systems with renewable energies and storage », Energy Syst, 2017,
- [71] Y. LASMI, « Optimisation de la Poursuite du Point de Puissance Maximale (MPPT) d'un Système Photovoltaïque par les Techniques Intelligentes », Mémoire de Magister, Université Sétif, 2013.
- [72] Ahmad Taher Azar, Nashwa Ahmad Kamal, « Renewable Energy Systems Modeling, Optimization and Control », Academic Press- Elsevier, 2021.
- [73] S.Manoj , R. Sahni, « Applied Mathematical Modeling and Analysis in Renewable Energy », CRC Press - Taylor & Francis , 2022.
- [74] A.Meharrar, « Modélisation, Optimisation et Contrôle des Systèmes Hybrides : Eolienne/Pile à combustible », Thèse de doctorat, Université des Sciences et de technologie d'Oran, 2012.
- [75] D. Hania, L.Lydia , M.SAID Zoubir, « Synthèse des méthodes de commande MPPT sous ombrage total et partiel », Thèse de Master , Université A.MIRA-BEJAIA, 2019/2020
- [76] A. OMAR, «Etude comparative entre différents modèles électriques photovoltaïques» UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI OUM EL BOIAGHI, OUM EL BOUGHY, 2012.
- [77] Jade-Technologie (@JadeTechnologie) 3 mars 2021 #énergierenouvelable #PV #Transitionénergétique #iot
- [78] Y.Abdelhak ,T. Belkacem, «Modélisation d'une pile à combustible de type PEM », Thèse de Master, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2016 /2017.
- [79] A.LACHICHI, « Modélisation et stabilité d'un régulateur hybride de courant application aux convertisseurs pour pile à combustible », thèse de doctorat université de franche-comté, 2005
- [80] Cours disponible sur: www.ulb.ac.be/infosciences/files/piles.pdf

- [81] NATSHEH Emad Maher «Hybrid Power Système Energy Management Based on Artificial Intelligence», doctorat, School of Engineering, Université Manchester Metropolitan, juillet 2013.
- [82] AHMADI ISMAIL, " Etude et simulation d'un système de pompage d'eau couplé à un générateur photovoltaïque", Mémoire de Master, Université Larbi ben M'Hidi-Oum El Bouaghi. 2013.
- [83] M.Boukli - Hacene Omar, « Conception et Réalisation d'un Générateur e Muni d'un Convertisseur MPPT pour une Meilleure Gestion Energétique », Mémoire de Magister, Université AbouBakr Belkaid - Tlemcen, 2010.
- [84] Kraimia Adel, « Etude d'un système hybride (Eolien-Photovoltaïque) », Mémoire de Master, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA, 2019/2020
- [85] P.Thoun thong, « Conception D'une Source Hybride Utilisant Une Pile A Combustible Et Des Super-Condensateurs », Thèse Doctorat, L'Institut National Polytechnique de Lorraine, 2005.
- [86] ATCHOUM safa, « Réalisation d'un convertisseur BUCK – MPPT », Mémoire de Master, Université LARBI BEN M'HIDI Oum El-Bouaghi, 2016/2017
- [87] <https://public.iutenligne.net/>
- [88] Yao, Kai, Weijie Tang, Xiaopeng Bi, and Jianguo Lyu. "An Online Monitoring Scheme of DC-Link Capacitor's ESR and C for a Boost PFC Converter." IEEE Transactions on Power Electronics IEEE Trans,2016.
- [89] F. Belhachemi, S. Raël, B. Davat, «Supercapacitors electrical behaviour for power electronics applications», 9th International Conference and Exhibition on Power Electronics and Motion Control , 2000.
- [90] web site : data-sheet des Fabricants de super-condensateurs actuels.
- [91] M.Dahmane, « Gestion, Optimisation et Conversion des Énergies pour Habitat Autonome », Thèse de doctorat, Université de Picardie Jules Verne, 2020.
- [92] Belkacem KORICH, Contribution à l'amélioration des performances d'un système d'énergie renouvelable, DOCTORAL THESIS, UNIVERSITE ZIANE ACHOUR-DJELFA
- [93] Maria Zemzami¹ , Norelislam Elhami² , Abderahman Makhoulfi³ , Mhamed Itmi⁴ , Nabil Hmina⁵ , Application d'un modèle parallèle de la méthode PSO au problème de transport d'électricité, Université de Normandie, INSA, Rouen
- [94] J. Goncalves, J. Mendes et M. Resende, «A genetic algorithm for the resource constrained multiproject scheduling problem,» European Journal of Operational Research, vol. 189, n° 13, p.

- [95] S.Bensmail ,« Optimisation et Gestion d'Energie D'un Système Hybride A Energies Renouvelables »,Thèse de doctorat, Université de Bejaïa, 2017.
- [96] A. Berrada, R. El Mrabet, « Hybrid Energy System Models », Elsevier, 2021

ملخص

الهدف الرئيسي لهذا العمل هو نمذجة ومحاكاة والتحكم والإشراف على نظام طاقة مستقل هجين يعتمد على الطاقة المتجددة. يتضمن ، ونظام تخزين يتضمن بطاريات وسوبر كابتور لتشغيل حمل معزول. PEM النظام مصدرًا للطاقة الشمسية، وخلية وقود من نوع يتم التعامل مع ثلاثة جوانب رئيسية، وهي اختيار التكوين الأنسب وتحقيق أقصى استفادة من المصادر المتجددة وتصميم النظام. يتم التقليدية والمتقدمة (MPPT) تقديم نمذجة ومحاكاة لمختلف عناصر النظام الهجين. يتم تقديم خوارزميات تتبع نقطة القدرة القصوى ومقارنتها لتحقيق كفاءة طاقة مثلى من خلال استغلال المصادر المتجددة. لتحسين أداء النظام، يتم تنفيذ خوارزمية إشراف لإدارة تدفق الطاقة بين النظام الهجين والحمل. يعتمد المشرف على معلمات مثل الحالة الشاملة لشحنة نظام التخزين والظروف الجوية والطاقة المطلوبة من الحمل، ويمارس التحكم المركزي ويفرض وضع تشغيل مناسب للنظام. تظهر نتائج المحاكاة المنجزة في بيئة فعالية الهيكل المقترح وموثوقية خوارزمية الإدارة المطبقة MATLAB/Sim.Power.System

الكلمات المفتاحية: نظام الطاقة الهجين ، الكهروضوئية ، مكثفة فعالة ، خلية الوقود ، نظام تخزين إدارة الطاقة ، التحسين ، التحكم ، المحاكاة ، MPPT

Résumé

Ce travail vise à modéliser, simuler, commander et superviser un système hybride de puissance autonome basé sur les énergies renouvelables. Le système comprend une source photovoltaïque, une pile à combustible de type PEM et un système de stockage comprenant des batteries et des super condensateurs, afin d'alimenter une charge isolée. Trois aspects principaux sont abordés : le choix de la configuration la plus adaptée, la maximisation de l'utilisation des ressources renouvelables et le dimensionnement du système. Une modélisation et une simulation des différents éléments du système hybride sont présentées. Des algorithmes de suivi de point de puissance maximale (MPPT), à la fois classiques et avancés, sont introduits et comparés pour obtenir un rendement énergétique optimal en exploitant les deux sources renouvelables. Pour améliorer les performances du système, un algorithme de supervision est mis en place pour gérer le flux de puissance entre le système hybride et la charge. Ce superviseur, basé sur des paramètres tels que l'état de charge global du système de stockage, les conditions météorologiques et la puissance demandée par la charge, assure un contrôle centralisé et impose un mode de fonctionnement approprié au système. Les résultats de simulation réalisés dans l'environnement MATLAB/Sim.Power.System démontrent l'efficacité de la structure proposée et la fiabilité de l'algorithme de gestion mis en œuvre.

Mots clés : système d'énergie hybride, photovoltaïque, pile à combustible, super condensateur système de stockage gestion d'énergie, optimisation, commande, simulation, MPPT.

Abstract

The main objective of this work is to model, simulate, control, and supervise an autonomous hybrid power system based on renewable energy. The proposed structure consists of photovoltaic (PV) systems, proton exchange membrane (PEM) fuel cells, and a storage system (batteries and supercapacitors) to power an isolated load. Three main aspects are addressed: selecting the most suitable configuration, maximizing the utilization of renewable resources, and sizing the studied system. The different elements of the hybrid system are modeled and simulated. Classic and advanced Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithms are introduced and compared to achieve maximum energy efficiency by harnessing both renewable sources. To enhance system performance, a supervisory algorithm is implemented to manage the power flow between the hybrid power system and the load. The supervisor, based on parameters such as the overall state of charge of the storage system, weather conditions, and the power demand of the load, exercises centralized control and enforces an appropriate operating mode for the system. Simulation results conducted in the MATLAB/Sim.Power.System environment demonstrate the effectiveness of the proposed structure and the reliability of the implemented control algorithm

Keywords: hybrid energy system, photovoltaic, ultra condensation fuel cell, energy management storage system, optimization, control, simulation, MPPT

