

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 : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux électrique

THÈME

Simulation et gestion du flux énergétique d'un système hybride autonome (photovoltaïque/ pile à combustible)

Préparé par : Mr. KOURMA Amar
Mr. LAICHE FOUZI Abdelghani

Devant le Jury :

Nom et prénoms	Grade	Qualité
Mr. HABRI. Khaled	MAA	Président
Mr. BERKANI. Abderrahmane	MCA	Examineur
Mr. ARARIA. Rabah	MCB	Examineur
Mr. KOULALI .Mostefa	MAA	Encadreur
Mr. BOUMEDIENE Bachir	MCB	Co-Encadreur

Promotion : 2021/2022

Remerciement

*Ce n'est qu'après l'achèvement de cet humble travail que nous ne pouvons que remercier **ALLAH** Tout-Puissant qui nous a donné la force et la patience pour continuer et achever cette recherche.*

*Nous adressons également nos remerciements les plus chaleureux et beaucoup d'appréciation à notre encadreur Monsieur **Koufali Mostefa**, Docteur au département de génie électrique à l'Université Ibn Khaldoun(Tiaret), pour son encadrement, pour sa présence et ses conseils. Nous sommes très fiers d'avoir collaborés avec cette personne de grande qualité humaine et scientifique.*

*Nous remercions aussi Monsieur **Boumediene Bachir**, Maître de conférences au département de génie électrique à l'Université Ibn Khaldoun (Tiaret), Co-encadrant de cette mémoire pour sa disponibilité, son soutien et son implication pour le bon déroulement de ce travail.*

*Nous remercions Monsieur **Habri Khaled**, pour nous avoir fait l'honneur d'accepter la présidence du jury de soutenance.*

*Nous tenons à remercier Messieurs **ARARJA. Rabah** et **BERKANI. Abderrahmane** d'avoir accepté d'examiner ce modeste travail.*

Nous adressons nos sincères remerciements également à tout le corps enseignant de département de génie électrique, pour leurs disponibilités et encouragement.

Enfin, nous réservons une place privée à nos parents, pour leur soutien inconditionnel tout au long de notre travail, sans lequel rien ne serait possible.

Finalement, je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'achèvement de ce travail.

Dédicaces

Tout d'abord, je rends grâce à Allah pour toutes ses bénédictions et la grâce de la réussite.

À mon cher père qui m'a toujours soutenu et m'a aidé à affronter les difficultés.

À ma chère mère, pour ses sacrifices depuis qu'elle m'a mise au monde ;

Mes chers frères : Anes, Zakaria, Brahim et Abd el aziz ;

À mes tantes et mes oncles.

À toute ma famille et tous ceux que j'aime.

À mon binôme Amar, pour m'avoir participé ce travail

Pour tous ceux qui ont fait pour que je puisse les honorer.

Tous mes amis, chacun en son nom.

Pour tous les enseignants du département de génie électrique. Je dédie cet humble travail.

AbdElGhani Fouzi Laiche

Dédicaces

Tout d'abord, je rends grâce à Allah pour toutes ses bénédictions et la grâce de la réussite.

À mon cher père qui m'a toujours soutenu et m'a aidé à affronter les difficultés ;

À ma chère mère, pour ses sacrifices depuis qu'elle m'a mis au monde

Mes chers frères : Ahmed, Alarbi, wallid, abdellah et abdelhakim ;

À mes tantes et mes oncles.

À toute ma famille et tous ceux que j'aime.

À mon binôme Fouzi, pour m'avoir participé ce travail

Pour tous ceux qui ont fait pour que je puisse les honorer.

Tous mes amis, chacun en son nom.

Pour tous les enseignants du département de génie électrique. Je

dédie cet humble travail.

Kourma Amar

sommaire

Introduction générale2

Chapitre I : Etat de l’art sur les énergies renouvelables et les systèmes de production hybrides...3

I.1 Introduction :4

I.2. Les énergies renouvelables :4

I.2.1. Définition :4

I.2.2. Différentes ressources des énergies renouvelables :4

I.2.2.1. Énergie Photovoltaïque :4

I.2.2.2. Solaire :5

I.2.2.3. Éolienne :5

I.2.2.4. Géothermie :6

I.2.2.5. Biomasse :7

I.2.2.6. Hydraulique :8

I.3. Système hybride :9

I.3.1. Définition :9

I.3.2. Importance de l’hybridation :10

I.3.3. Classification des systèmes d’énergie hybride11

I.3.3.1. Le régime du fonctionnement :11

I.3.3.2. La structure du système hybride :12

I.3.3. Configuration des systèmes hybrides:13

I.3.3.1. Architecture à bus continu :13

I.3.3.2. Architecture à bus alternatif :14

I.3.3.3. Avantages et inconvénients de chaque architecture :15

I.3.4. Critères d’optimisation du système hybride :15

I.3.5. Systèmes hybrides avec source conventionnelle :16

I.3.5.1. Systèmes photovoltaïque/source conventionnelle :16

I.3.5.2. Systèmes hybrides photovoltaïque/stockage :17

I.4. Principes de production de l’énergie photovoltaïque :18

I.4.1. Principe de fonctionnement de photovoltaïque :18

I.4.2 La photopile :19

I.4.3. Le module photovoltaïque :21

I.4.4. Générateur Photovoltaïque :21

I.5. Les pile à combustibles :22

I.5.1. Différents types de pile à combustible et leurs caractéristiques :22

I.5.2. Principe de fonctionnement :	23
I.5.3. Eléments de base d'une cellule élémentaire de pile PEM :	24
I.6. Systèmes de stockage :	26
I.6.1. Les Batteries	27
I.6.1.1. Principe général de fonctionnement d'une batterie	27
I.6.1.2. types des batteries :	28
Chapitre II : Modélisation des éléments du système hybride	30
II.1 Introduction :	30
II.2 Modélisation d'une cellule photovoltaïque	30
II.2.1 Module photovoltaïque utilisé.....	31
II.2.2 Caractéristiques de module photovoltaïque	32
II.2.3 Influence de la variation des conditions météorologiques sur les paramètres du module photovoltaïque.....	33
II.2.3.1 Influence de la température	33
II.2.3.2 Influence de l'irradiation	33
II.2.4 Constitution d'un générateur photovoltaïque	34
II.2.4.1 Câblage séries des cellules	35
II.2.4.2 Câblage parallèles des cellules	35
II.2.4.3. Association série/parallèle.....	36
II.2.5 Protections classiques d'un générateur photovoltaïque.....	36
II.2.6 Modélisation hacheur Boost.....	37
II.2.7 MPP basée sur la méthode de perturbe et d'observe (P&O).....	39
II.3 Modélisation de la pile à combustible.....	41
II.3.1 Représentation électrique de la pile.....	41
II.3.2 Caractéristique tension/densité de courant :	43
II.3.3 Modélisation du hacheur boost (élevateur)	44
II.4 Modélisation de la batterie	45
II.4.1 Modélisation du convertisseur DC/DC (Back –Boost)	47
II.4.1.1Fonctionnement d'un convertisseur DC/DC (Back –Boost)	47
II.4.1.2 Calcul des paramètres de L et C du convertisseur.....	47
II.5 Modélisation du bus continu	48
II.5.1 Estimation de la valeur de la tension du bus continu	49
II.6 Conclusion.....	49
Chapitre III : Simulation et gestion des éléments du système hybride	30

III.1 Introduction.....	51
III.2 Description du schéma d'énergie proposé pour notre étude	51
III.3. Contrôle de la chaine photovoltaïque.....	52
III.3.1 Contrôle du GPV	52
III.3.2 Résultats de simulation	53
III.3.2.1 Données météorologiques nominales.....	53
III.3.3 Schéma de simulation de PV :	55
III.4 Contrôle de la pile à combustible.....	57
III.4.1 Dimensionnement	57
III.4.2. Modèle et circuit de commande de la PAC.....	58
III.4.3. Schéma et Résultats de simulation de la pile à combustible:	60
III.4.4. Résultats de simulation de la pile à combustible :	61
III.5. Contrôle de la batterie	64
III.5.1 système de commande	64
III.5.2. Schéma et Résultats de simulation de Batterie :	66
III.6. Gestion du système hybride	68
III.6.1. Schémas et Résultats de simulation	68
III.6.2. Résultat de simulation de système hybride	70
III.6.4. Les interprétations des résultats	73
III.7. Conclusion	76
Conclusion générale.....	78
Annexes.....	80
Bibliographie.....	82

Liste des figures

Chapitre I

FIGURE. I. 1. SCHEMA DE FONCTIONNEMENT DU PHOTOVOLTAIQUE. 5

FIGURE. I. 2. . EOLIENNE A L'AXE VERTICAL (A) ET L'AXE HORIZONTAL (B) 6

FIGURE. I. 3. . SCHEMA FONCTIONNEL DE GEOTHERMIQUE 7

FIGURE. I. 4. SCHEMA DE FONCTIONNEMENT DE BIOMASSE8

FIGURE. I. 5. SCHEMA DE FONCTIONNEMENT DE L'HYDRAULIQUE 9

FIGURE. I. 6. CONFIGURATIONS D'UN SYSTEME HYBRIDE 11

FIGURE. I. 7. CLASSIFICATION DES SYSTEMES D'ENERGIE HYBRIDE 32

FIGURE. I. 8. CONFIGURATION DU SYSTEME HYBRIDE A BUS CONTINU. 33

FIGURE. I. 9. CONFIGURATION DU SYSTEME HYBRIDE A BUS ALTERNATIF 14

FIGURE. I. 10. SCHEMA DE SYSTEME HYBRIDE AVEC CONNEXION SERIE 16

FIGURE. I. 11. . SCHEMA DE SYSTEME HYBRIDE AVEC CONNEXION PARALLELE 17

FIGURE. I. 12. SYSTEME HYBRIDE PHOTOVOLTAÏQUE/STOCKAGE 18

FIGURE. I. 13. FONCTIONNEMENT GENERALE D'UNE INSTALLATION SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE 19

FIGURE. I. 14. . PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA CELLULE PV 20

FIGURE. I. 15. . SCHEMA EQUIVALENT D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE 20

FIGURE. I. 16. . GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE 21

FIGURE. I. 17. SCHEMA DE PRINCIPE D'UN ASSEMBLAGE DE CELLULES ELEMENTAIRES. 22

FIGURE. I. 18. SCHEMA DE PRINCIPE D'UNE PILE A COMBUSTIBLE PEMFC 24

FIGURE. I. 19... ELEMENT DE BASE D'UNE CELLULE DE PILE A COMBUSTIBLE PEM..... 25

Chapitre II

FIGURE. II. 1. . CIRCUIT EQUIVALENT D'UNE CELLULE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE 30

FIGURE. II. 2. CARACTERISTIQUE COURANT-TENSION D'UN MODULE PHOTOVOLTAÏQUE 32

FIGURE. II. 3. . CARACTERISTIQUE PUISSANCE-TENSION D'UN MODULE PHOTOVOLTAÏQUE 32

FIGURE. II. 4. CARACTERISTIQUE PUISSANCE – TENSION D'UN MODULE PHOTOVOLTAÏQUE POUR UNE VARIATION DE TEMPERATURE ET $G = 1000W/M^2$ 33

FIGURE. II. 5. CARACTERISTIQUE PUISSANCE – TENSION D'UN MODULE PHOTOVOLTAÏQUE POUR UNE VARIATION DE TEMPERATURE ET $G = 1000W/M2$ 33

FIGURE. II. 6. CARACTERISTIQUE COURANT –TENSION D'UN MODULE PHOTOVOLTAÏQUE POUR DIFFERENT NIVEAU D'IRRADIATION ET $T=25\text{ }^\circ\text{C}$ 34

FIGURE. II. 7. CARACTERISTIQUE PUISSANCE – TENSION D'UN MODULE PHOTOVOLTAÏQUE POUR DIFFERENT NIVEAU D'IRRADIATION ET $T=25\text{ }^\circ\text{C}$ 34

FIGURE. II. 8. CARACTERISTIQUES DE CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES EN SERIE. 35

FIGURE. II. 9. CARACTERISTIQUES DE CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES EN PARALLELE. 35

FIGURE. II. 10. CARACTERISTIQUES DE CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES EN SERIE/PARALLELE**36**

FIGURE. II. 11. SCHEMATISATION D'UN GPV ELEMENTAIRE AVEC DIODES BY-PASS ET DIODE ANTI-RETOUR. 37

FIGURE. II. 12. SCHEMA DE PRINCIPE D'UN CONVERTISSEUR BOOST 37

FIGURE. II. 13. SCHEMAS EQUIVALENTS DU HACHEUR SURVOLTEUR. 38

FIGURE. II. 14. CARACTERISTIQUE PUISSANCE - TENSION D'UN PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE. 40

FIGURE. II. 15. ORGANIGRAMME DE L'ALGORITHME MMP DE LA PERTURBATION & OBSERVATION	40
FIGURE. II.16 . REPRESENTATION ELECTRIQUE D'UNE PILE A COMBUSTIBLE.....	41
FIGURE. II.17. CARACTERISTIQUE VPAC(IPAC) ET PPAC (IPAC) A T=25°C.	44
FIGURE. II. 18. CARACTERISTIQUE VPAC(IPAC) ET PPAC(IPAC) POUR DIFFERENTES TEMPERATURES.....	44
FIGURE. II. 19. CHEMA DE HACHEUR TYPE BOOST.	45
FIGURE. II. 20. MODELE R-C DE LA BATTERIE.	46
FIGURE. II. 21. MONTAGE DE BACK/BOOST DU CONVERTISSEUR DC-DC.....	47
FIGURE. II. 22. MODELE DU BUS CONTINU	48

Chapitre III

FIGURE. III. 1. SCHEMA SYNOPTIQUE DU SYSTEME HYBRIDE ETUDIE CONNECTE A UNE CHARGE ALTERNATIVE.	51
FIGURE. III. 2. CONVERTISSEUR BOOST AVEC CONTROLE MPPT.	52
FIGURE. III. 3. TENSIONS D'ENTRE DE L'HACHEUR BOOST	52
FIGURE. III. 4.TENSIONS DE SORTIE DE L'HACHEUR BOOST	54
FIGURE. III. 5. COURANTS D'ENTRE DE L'HACHEUR BOOST.	54
FIGURE. III. 6. COURANTS DE SORTIE DE L'HACHEUR BOOST.	54
FIGURE. III. 7. SCHEMA DE SIMULATION DE GPV	55
FIGURE. III. 8. RESULTATS DE SIMULATION DE GPV	56
FIGURE. III. 9. CONVERTISSEUR SURVOLTEUR (BOOST) CONNECTE A LA PILE A COMBUSTIBLE	57
FIGURE. III. 10. SCHEMA FONCTIONNEL DE LA MODELISATION ET DU CONTROLE DU CONDITIONNEMENT DE PUISSANCE.....	59
FIGURE. III. 11. SCHEMA DE SIMULATION DE LA PILE A COMBUSTIBLE	60
FIGURE. III. 12. ALLEURES DE TENSION ET COURANT DE CHARGE FC	61
FIGURE. III. 13. ALLEURES DE TENSION ET COURANT DE FC	62
FIGURE. III. 14. RESULTAT DE SIMULATION DE FC	64
FIGURE. III. 15. CONTROLE DE LA BATTERIE.....	64
FIGURE. III. 16. SCHEMA DE CONTROLE POUR LE CONVERTISSEUR STOCKAGE RATTACHE A LABATTERIE.	65
FIGURE. III. 17. SCHEMA DE SIMULATION DE LA BATTERIE.	66
FIGURE. III. 18. RESULTATS DE SIMULATION DE LA BATTERIE EN CAS DE CHARGE	67
FIGURE. III. 19. SCHEMA GLOBALE DE SYSTEME HYBRIDE	68
FIGURE. III. 20. SCHEMA DE SIMULATION DE SYSTEME HYBRIDE	69
FIGURE. III. 21. RESULTATS DE SIMULATION DE LA CHARGE DU SYSTEME HYBRIDE.	70
FIGURE. III. 22. RESULTATS DE SIMULATION DE GPV DU SYSTEME HYBRIDE	70
FIGURE. III. 23. RESULTATS DE SIMULATION DE LA PILE A COMBUSTIBLE DU SYSTEME HYBRIDE	71
FIGURE. III. 24. CONVERTISSEUR SURVOLTEUR (BOOST) CONNECTE A LA PILE A COMBUSTIBLE	71
FIGURE. III. 25. LES DIFFERENTES ETAPES FONCTIONNEMENT.	74
FIGURE. III. 26. ORGANIGRAMME DES GESTIONS DE SYSTEME HYBRIDE.....	75

Liste des tableaux

CHAPITRE I

Tableau I.1. Avantages et inconvénients d'un système hybride	10
Tableau I.2. Les avantages et les inconvénients des bus : DC et AC	14
Tableau I.3. Caractéristiques des différentes technologies de stockage	21
Tableau I.4. Les différents types de piles à combustible	21

Liste des abréviations

Liste des abréviations

SEH	Système Energie Hybride.
PV	Photovoltaïque.
CC	Courant Continu.
CA	Courant Alternatif.
DC/DC	Convertisseur Courant continu/ Courant continu.
DC/AC	Convertisseur Courant continu/ Courant Alternatif.
EDC	État de Charge des batteries (State Of Charge).
SOC	State Of Charge.
GPV	Générateur Photovoltaïque.
MPP	Maximum Power Point.
MPPT	Maximum Power Point Tracking.
P&O	Perturbation et Observation.
FC	Fuel Cell.
PAC	Pile À Combustible.
AFC	Alcaline Fuel Cells (piles alcalines).
PEMFC	Piles à membrane échangeuse de protons.
PAFC	Phosphorique Acid Fuel Cells (piles à acide phosphorique).
SOFC	Solid Oxide Fuel Cells (piles à électrolyte solide).
DMFC	Direct-Methanol Fuel Cell (piles à méthanol direct).
PI	Proportionnelle intégrale.

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].

I_0 : 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].

N_{oct} : 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 [$^{\circ}C$].

$T_{jréf}$: La température de jonction de référence [$^{\circ}C$].

T : La température ambiante [$^{\circ}C$].

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} .

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 groupes 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].

Symboles et notations

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

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

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].

\dot{A} : 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.

I_{FC} : Densité du courant de fonctionnement permanent [A/cm²].

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

Introduction générale

Introduction générale

La consommation énergétique mondiale est en très forte croissance dans toutes les régions du monde, ceci est lié à la croissance de la population mondiale ainsi qu'à l'activité industrielle des pays en voie de développement qui a entraîné une explosion des besoins en énergie.

L'utilisation des énergies renouvelables comme alternative écologique aux combustibles fossiles et au nucléaire, s'avère une solution très attrayante du fait que celles-ci sont inépuisables, non polluantes, très adaptées à la production décentralisée et les technologies sont actuellement au point pour utiliser ces énergies au quotidien. Leur exploitation pour la production d'électricité est très rentable dans les sites isolés ; là où l'extension du réseau électrique serait un échec financier [2].

Comme pour toutes, les sources d'énergie renouvelables, elles ont aussi leurs inconvénients : On note en priorité le coût relativement élevé des installations nécessaires dont on peut espérer leur durée pendant des années. De plus, la plupart de ces énergies vertes sont soumises aux caprices de la dame nature. En fait, les jours sans vent ou sans trop de lumière peuvent sérieusement entraver la production d'énergie éolienne et solaire et peuvent ne pas être disponibles toute heure de la journée [3].

Dans ce travail, nous avons étudié un système hybride et avons fait une application sur une charge. Et par définition le système hybride est une combinaison de deux sources d'énergie, une classique et l'autre renouvelable. L'objectif principal de cette étude est d'incarner le système hybride sur la charge, et cela en utilisant à la fois des panneaux solaires, des piles à combustible et des batteries pour stocker et transférer de l'énergie si nécessaire. Pour cela, notre travail sera structuré comme suit :

Le premier chapitre présente une description des différents concepts de base liés au système hybride (les panneaux solaires, la pile à combustible et les batteries), en mentionnant leurs types, les avantages et les inconvénients ainsi que le principe de fonctionnement de chaque concept.

Le second chapitre est consacré à la modélisation mathématique des différentes parties constituant le système à étudier, pour faciliter la simulation dans le troisième chapitre.

Dans le troisième et dernier chapitre, nous simulerons le système hybride en utilisant Matlab-Simulink, en extrayant puis en comparant les différentes courbes.

Chapitre I

***Etat de l'art sur les énergies renouvelables et les
systèmes de production hybrides***

I.1 Introduction :

L'énergie renouvelable est une énergie qui provient de sources illimitées et constamment renouvelables, contrairement à l'énergie non renouvelable dont les stocks s'épuisent, et son exploitation cause moins de dommages environnementaux et est également appelée énergie alternative, qui est l'énergie dérivée de sources renouvelables telles que le soleil, le vent, les rivières, les sources chaudes, les marées et les biocarburants.

Le monde est sur la voie des énergies renouvelables pour développer des solutions globales et durables aux problèmes environnementaux et préserver les matières fossiles, et ce choix stratégique est stimulé par l'énorme potentiel du monde de l'énergie solaire.

Les nouvelles solutions technologiques proposées restent des générateurs hybrides, même s'il est très complexe en termes d'utilisation et de stockage, il reste la solution idéale pour préserver l'environnement et la santé humaine.

I.2. Les énergies renouvelables :

I.2.1. Définition :

Les énergies renouvelables sont des énergies primaires inépuisables à très long terme, car issues directement de phénomènes naturels liés à l'énergie du soleil, de la terre ou de la gravitation. Les énergies renouvelables sont également plus « propres » (moins d'émissions de CO₂, moins de pollution) que les énergies issues de sources fossiles. [17]

I.2.2. Différentes ressources des énergies renouvelables :

I.2.2.1. Énergie Photovoltaïque :

L'énergie photovoltaïque se base sur l'effet photoélectrique pour créer un courant électrique continu à partir d'un rayonnement électromagnétique. Cette source de lumière peut être naturelle (soleil) ou artificielle (une ampoule). L'énergie photovoltaïque est captée par des cellules photovoltaïques, un composant électronique qui produit de l'électricité lorsqu'il est exposé à la lumière. Plusieurs cellules peuvent être reliées pour former un module solaire photovoltaïque ou un panneau photovoltaïque. Une installation photovoltaïque connectée à un réseau d'électricité se compose généralement de plusieurs panneaux photovoltaïques, leur nombre pouvant varier d'une dizaine à plusieurs milliers. [19].

I.2.2.2. Solaire :

Bien qu'elle ne soit pas l'énergie renouvelable représentant la puissance installée la plus importante, l'énergie solaire est de loin l'énergie renouvelable qui compte le plus d'installations. Dans la très grande majorité des cas, l'énergie solaire est convertie en électricité à l'aide d'installation Photovoltaïque (PV) qui permet de transformer le rayonnement solaire en courant continu.

L'autre solution, beaucoup plus rare et généralement pour des installations de puissances importantes, consiste à concentrer les rayonnements solaires pour produire de la chaleur qui est ensuite convertie en électricité. Le PV a l'avantage de présenter un coût d'installation modéré (face aux autres types de GED) grâce à un faible taux d'équipement et une implantation sur site peu contraignante. Les PV sont les GED les plus présentes sur le réseau de distribution, la majorité des installations ne dépassent pas quelques kilo Watt.

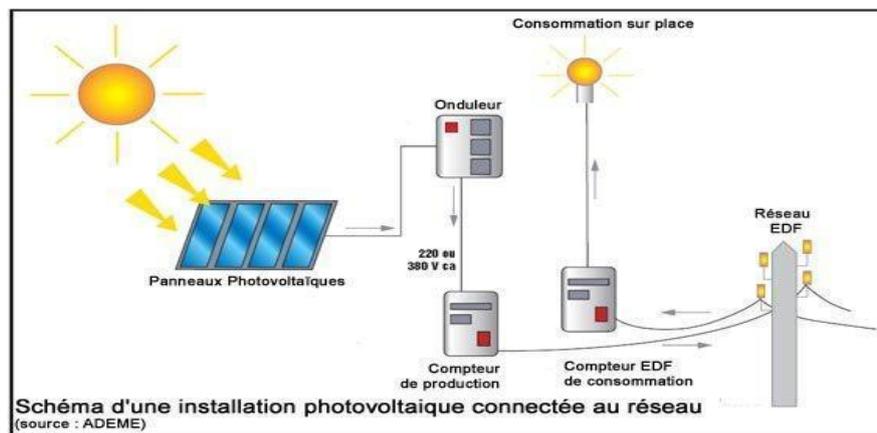


Figure I-1 :Schéma de fonctionnement du photovoltaïque

I.2.2.3. Éolienne :

Une éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Ensuite cette énergie est transformée en énergie électrique par l'intermédiaire d'une machine électrique. Les termes « parc éolien » ou « ferme éolienne » sont utilisés pour décrire les unités de production groupées, installées à terre – « onshore » ou dans la mer – « offshore ». Les coûts d'investissement sont relativement élevés, surtout pour le « offshore », mais l'énergie primaire est gratuite et l'impact environnemental est petit. Dans certaines régions, les éoliennes posent quand même quelques problèmes, liés au bruit de basse fréquence, désagréable pour les personnes qui habitent à côté et les impacts avec les troupeaux sur les oiseaux. [18]

Les petites éoliennes peuvent être à axe vertical ou axe horizontal (figure. I-2)

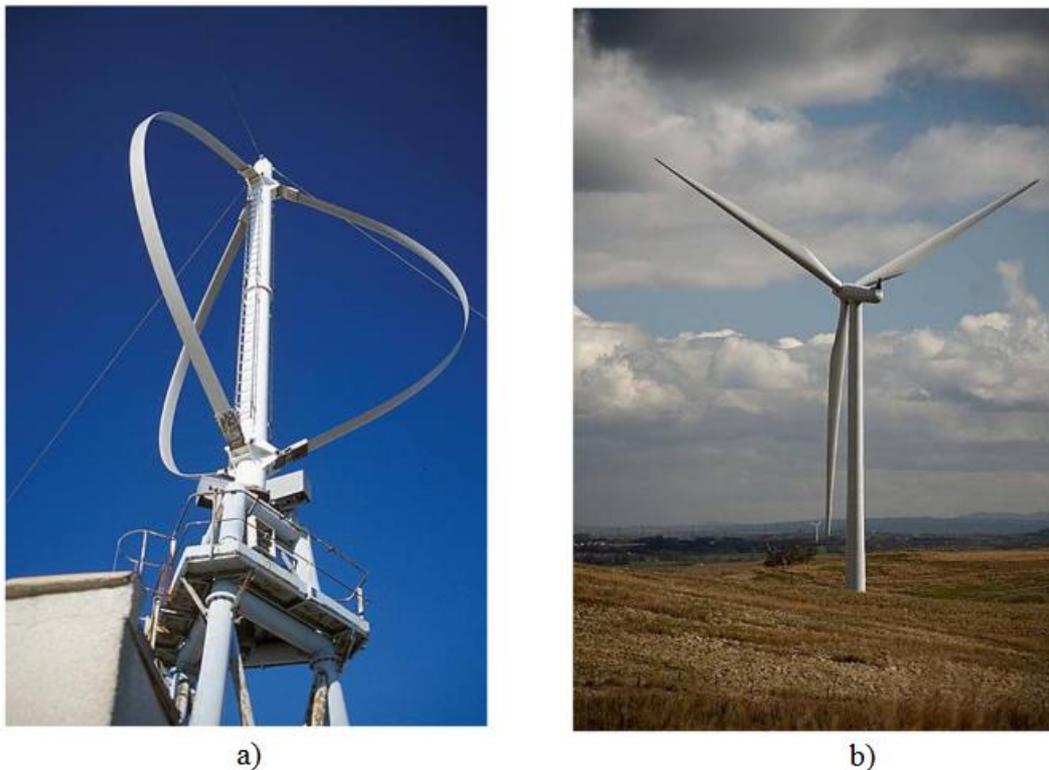


Figure. I.2 : Eolienne à l'axe vertical (a) et l'axe horizontal (b)

I.2.2.4. Géothermie :

Dans le contexte des sciences pour l'ingénieur, le terme de « géothermie » regroupe des moyens de capter l'énergie thermique de l'intérieur du globe terrestre et de l'utiliser comme source de chaleur ou de la convertir en électricité par des turbines et générateurs électriques.

Pour capter l'énergie géothermique, un fluide est mis en circulation dans les profondeurs de la terre. Ce fluide peut être celui d'une nappe captive naturelle, de l'eau injectée dans une roche chaude imperméable ou dans des puits spéciaux. Dans tous les cas, le fluide se réchauffe et remonte avec une température supérieure. Le principe d'utilisation de la géothermie pour générer l'électricité est présenté sur la figure. I.3

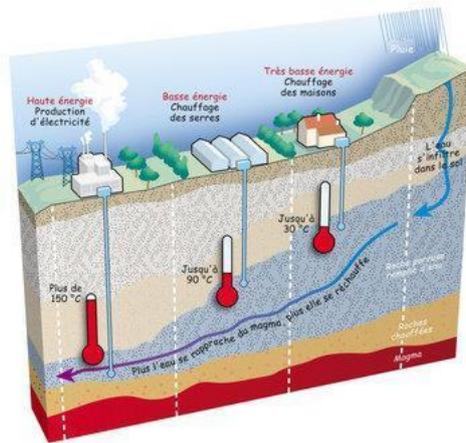


Figure I.3 : Schéma fonctionnel de géothermique

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. [18]

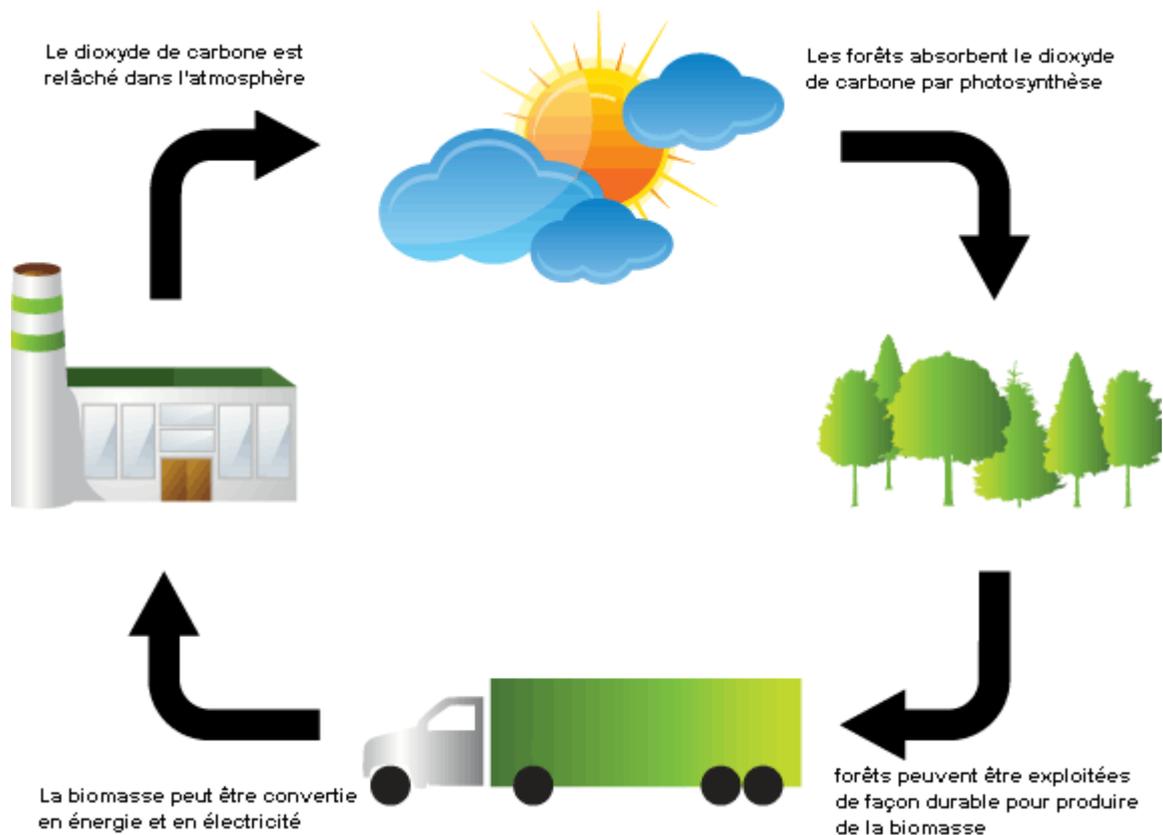


Figure I.4 : Schéma fonctionnement de Biomasse

I.2.2.6. Hydraulique :

Les centrales hydrauliques transforment l'énergie cinétique d'un flux d'eau en énergie électrique par l'intermédiaire d'une ou plusieurs turbines hydrauliques, couplées à des générateurs électriques (fig. 1-5). [18]

Les installations hydrauliques utilisent l'énergie potentielle de pesanteur de l'eau. Ce sont le débit et la hauteur de la chute d'eau qui dimensionnent la puissance de l'installation. Les centrales hydroélectriques peuvent être dites « au fil de l'eau », elles privilégient alors le débit à la hauteur, ou au contraire, de type « chute d'eau » où la puissance sera davantage issue de la hauteur. [18]

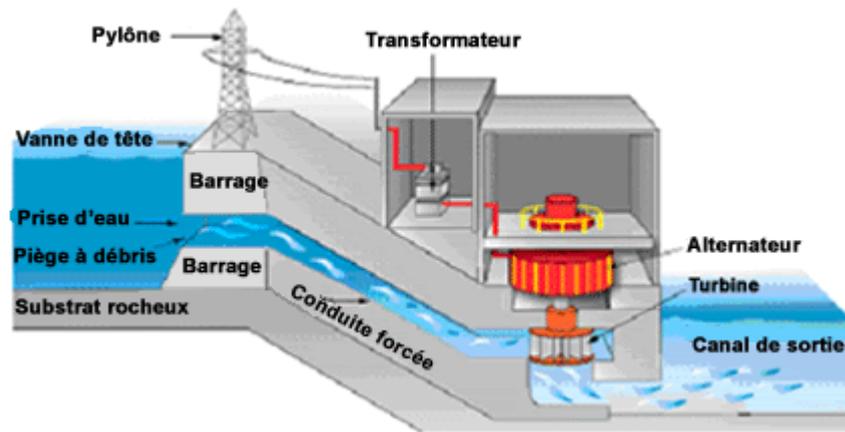


Figure I.5:Schéma de fonctionnement de l'Hydraulique

I.3. Système hybride :

I.3.1. Définition :

Les systèmes d'énergie hybride associent au moins deux sources d'énergies renouvelables aussi une ou plusieurs sources d'énergie classiques [22, 23], Les sources d'énergies renouvelables, comme le photovoltaïque et l'éolienne ne délivrent pas une puissance constante, mais vu leurs complémentarités, leur association 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 [23].

Le but d'un système d'énergie hybride est de produire le maximum d'énergie à partir des sources d'énergies renouvelables pour satisfaire la demande de la charge. En plus des sources d'énergie, un système hybride peut aussi incorporer un système de distribution à courant continu, un système de distribution à courant alternatif, un système de stockage, des convertisseurs, des charges et une option de gestion des charges ou un système de supervision. Toutes ces composantes peuvent être connectées en différentes architectures (voir figure (I.26 et I.27)). Les sources d'énergies renouvelables peuvent être connectées au bus continu ou alternatif en fonction de la dimension du système [24].

La puissance délivrée par les systèmes hybrides peut varier de quelques watts pour des applications domestiques jusqu'à quelques mégawatts pour les systèmes utilisés dans l'électrification de petits villages. Ainsi, les systèmes hybrides utilisés pour des applications de très faible puissance (en dessous de 5 kW) alimentent généralement des charges à courant

continu. Les systèmes plus grands, ayant une puissance supérieure à 100kW, connectés sur le bus à courant alternatif, sont conçus pour être connectés aux grands réseaux interconnectés ,

I.3.2. Importance de l'hybridation :

Aujourd'hui, il est devenu impératif pour les chercheurs de trouver en dehors des énergies fossiles et fissiles d'autres sources d'énergie propre et renouvelable. Il s'agit entre autre des énergies provenant des sources comme le soleil, le vent, la géothermie, la biomasse et l'océan. Ces sources d'énergie propre et durable sont favorables à l'environnement contrairement aux sources d'énergie conventionnelles. Toutefois, ces sources d'énergies renouvelables varient en fonction du temps de la journée, de la saison et de l'année. La nature aléatoire de ces sources a conduit les chercheurs à se tourner vers l'hybridation, c'est-à-dire la combinaison de deux ou plusieurs sources d'énergies renouvelables. L'hybridation apporte donc au système une disponibilité accrue et un approvisionnement constant des charges en énergie [14,15].

La combinaison de plusieurs sources d'énergie, surtout les renouvelables, permet d'optimiser au maximum les systèmes de production d'électricité, aussi bien du point de vue technique qu'économique. L'hybridation des sources d'énergies renouvelables a un intérêt considérable par leur flexibilité incomparable, leur souplesse de fonctionnement et leur prix de revient attractif.

De plus, l'hybridation permet de :

- Lisser la puissance délivrée par la source d'énergie;
- Palier pendant une durée limitée une indisponibilité partielle ou totale de la source d'énergie.

Tableau I.1 : avantages et inconvénients d'un système hybride [14, 25]

Avantages et inconvénients d'un système hybride	
Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">● Non dépendant d'une seule source d'énergie.● Flexible, extensible et capable de satisfaire des charges évolutives.● Exploitation simple, travaux de maintenance et de révision réduits.● Rentabilité, faible coût lié au cycle de vie des composants du système hybride	<ul style="list-style-type: none">● Plus complexe que les systèmes mono source et nécessite du stockage dans la majorité des cas.● Coût capital élevé comparé aux générateurs diesel

I.3.3. Classification des systèmes d'énergie hybride : [14, 33,35]

Plusieurs classifications de systèmes hybrides sont réalisées selon le critère choisi. Dans la suite on va présenter les classifications les plus répandues. Les systèmes hybride seront classier selon :

I.3.3.1. Le régime du fonctionnement :

Les systèmes hybrides peuvent être divisés en deux groupes (figure I.6). Dans le premier groupe, on trouve les systèmes hybrides, fonctionnent en parallèle avec le réseau électrique, appelés aussi connectés au 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.

Presque tous les systèmes d'alimentation qui sont conçus et optimisés pour répondre à la demande de puissance de zones éloignées sont des systèmes d'énergie non connectés au réseau (système autonome). Les systèmes autonomes varient considérablement en taille selon leurs applications.

Un système connecté au réseau (typiquement le réseau d'électricité publique) peut injecter ou s'alimenter en énergie directement dans le réseau. Ces opérations nécessitent la transformation de courant continu en courant alternatif et vice versa par un convertisseur (aussi appelé onduleur interactif).

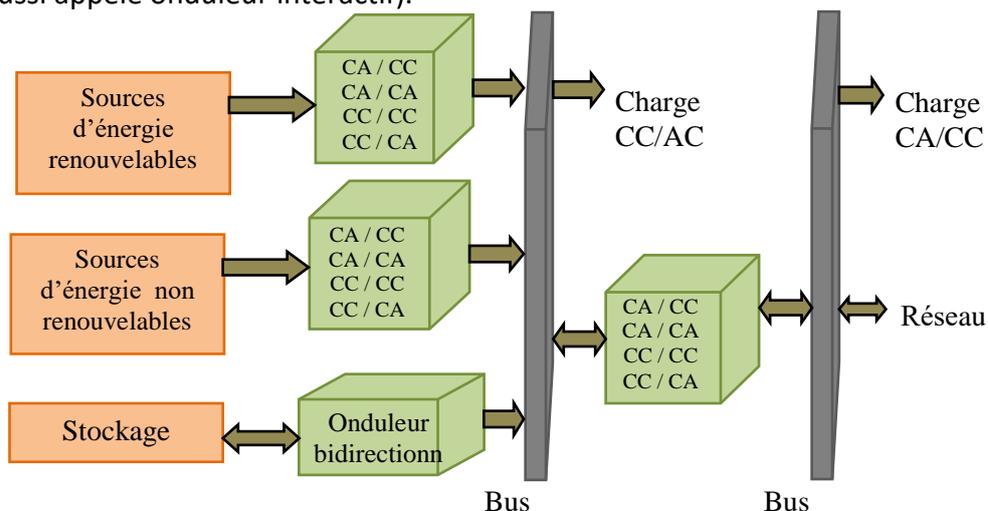


Figure I.6 : Configurations d'un système hybride [14] :

I.3.3.2. La structure du système hybride :

Trois critères peuvent être pris en compte dans le classement en fonction de la structure du système.

Le premier critère est la présence ou non d'une source d'énergie classique, comme un générateur diesel ou une micro turbine à gaz. [15, 35]

Un second critère possible est la présence ou non d'un dispositif de stockage. La présence d'un stockage permet d'assurer une meilleure satisfaction des charges électriques pendant les périodes d'absence d'une ressource primaire à convertir en électricité. Les dispositifs de stockage peuvent être des batteries rechargeables, des électrolyseurs avec réservoirs d'hydrogène, des volants d'inertie, etc...[15].

La dernière classification possible est celle relative au type de sources d'énergie renouvelables utilisées. La structure du système peut contenir un système photovoltaïque, une éolienne, un convertisseur d'énergie hydraulique (centrales hydroélectrique ou utilisation des vagues) ou une combinaison de ces sources. Un critère important pour la sélection de la source utilisée est le potentiel énergétique disponible qui dépend de l'endroit d'installation du système hybride. Un autre facteur déterminant est le consommateur électrique alimenté.

Son importance détermine le besoin d'une source supplémentaire, d'un dispositif de stockage et/ou d'une source conventionnelle [35]. Une généralisation de la classification présentée est

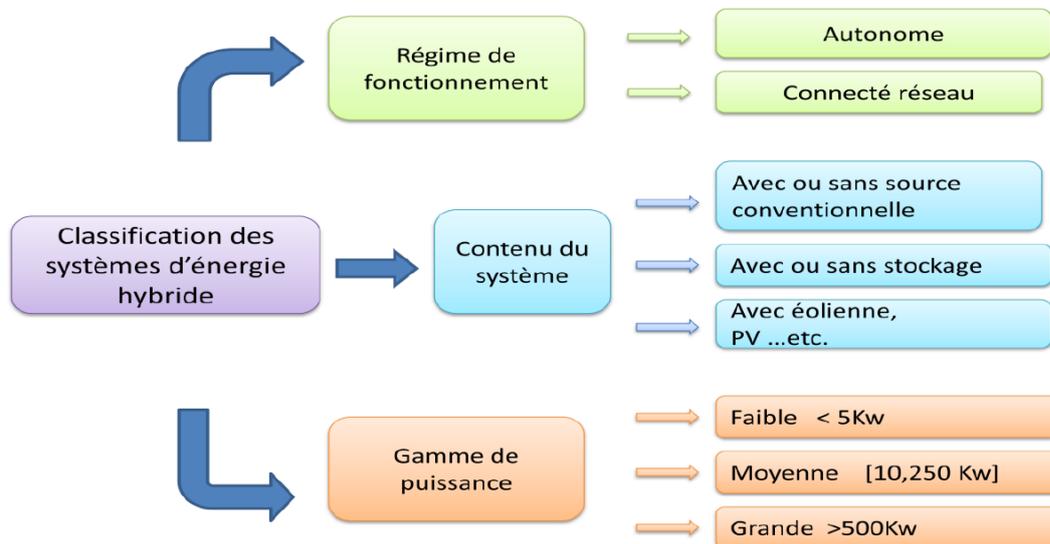


Figure I.7 : Classification des systèmes d'énergie hybride [11]

I.3.3. Configuration des systèmes hybrides:

Les générateurs photovoltaïques et éoliens dans un système hybride peuvent être connectés en deux configurations, architecture à bus continu et architecture à bus alternatif [23].

I.3.3.1. Architecture à bus continu :

Dans le système hybride présenté dans la figure (I-8), 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 [26]. L'onduleur doit alimenter les charges alternatives à partir du bus continu et doit suivre la consigne fixée pour l'amplitude et la fréquence [23]. Les batteries sont dimensionnées pour alimenter des pics de charge. La fonction spécifique du système de supervision est la commande de mise en marche et arrêt des générateurs et du système de stockage. L'avantage de cette topologie est la simplicité de commande [27].

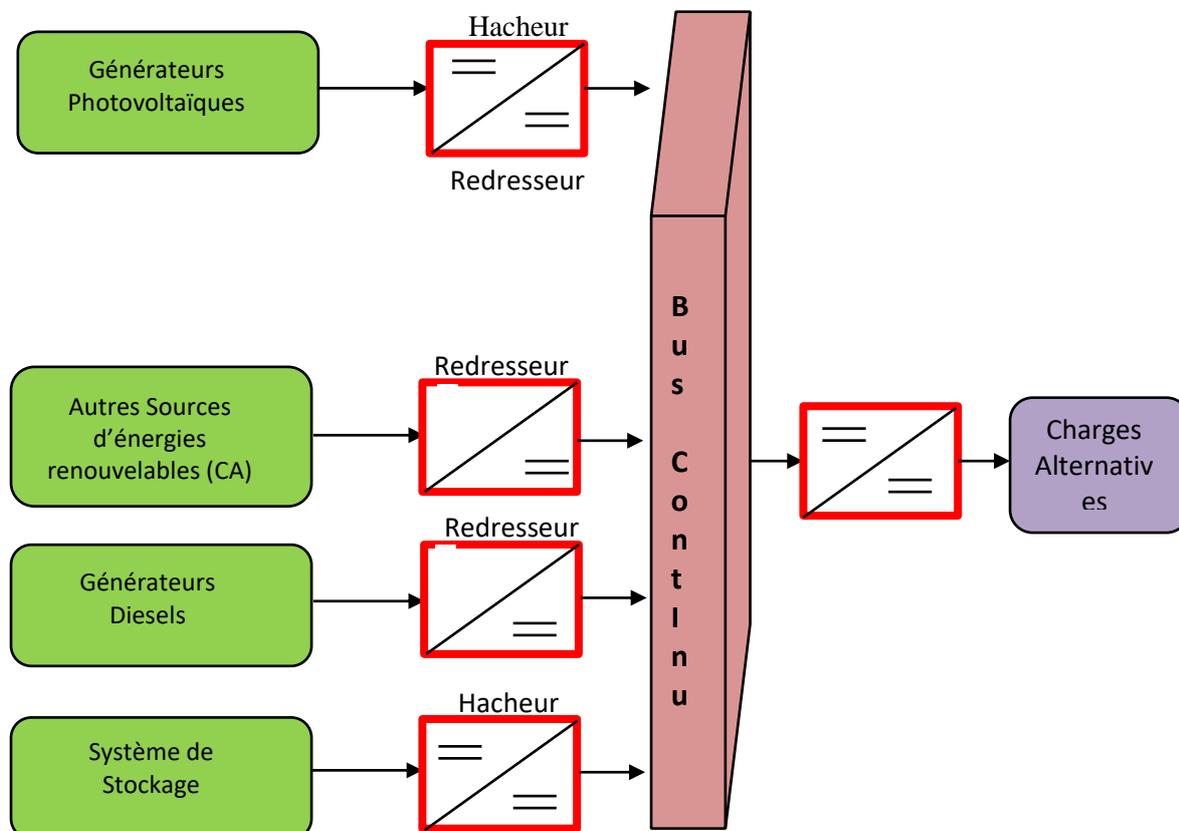


Figure I.8: Configuration du système hybride à bus continu [26] :

I.3.3.2. Architecture à bus alternatif :

Dans cette topologie, tous composants du système hybride sont reliés à la charge alternative, comme montrée sur la figure (I.9). 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 [34]. Ceci offre une flexibilité pour que les sources d'énergie puissent satisfaire la demande de la charge. Dans le cas d'une faible demande de charge, tous les générateurs et les systèmes de stockages sont à l'arrêt sauf par exemple le générateur photovoltaïque, pour couvrir la demande de la charge.

Cependant, pendant les fortes demandes de charge ou les heures de pointes les générateurs et les unités de stockage fonctionnent en parallèle pour couvrir 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 [34]. La configuration adaptée dans notre travail est celle à bus continu.

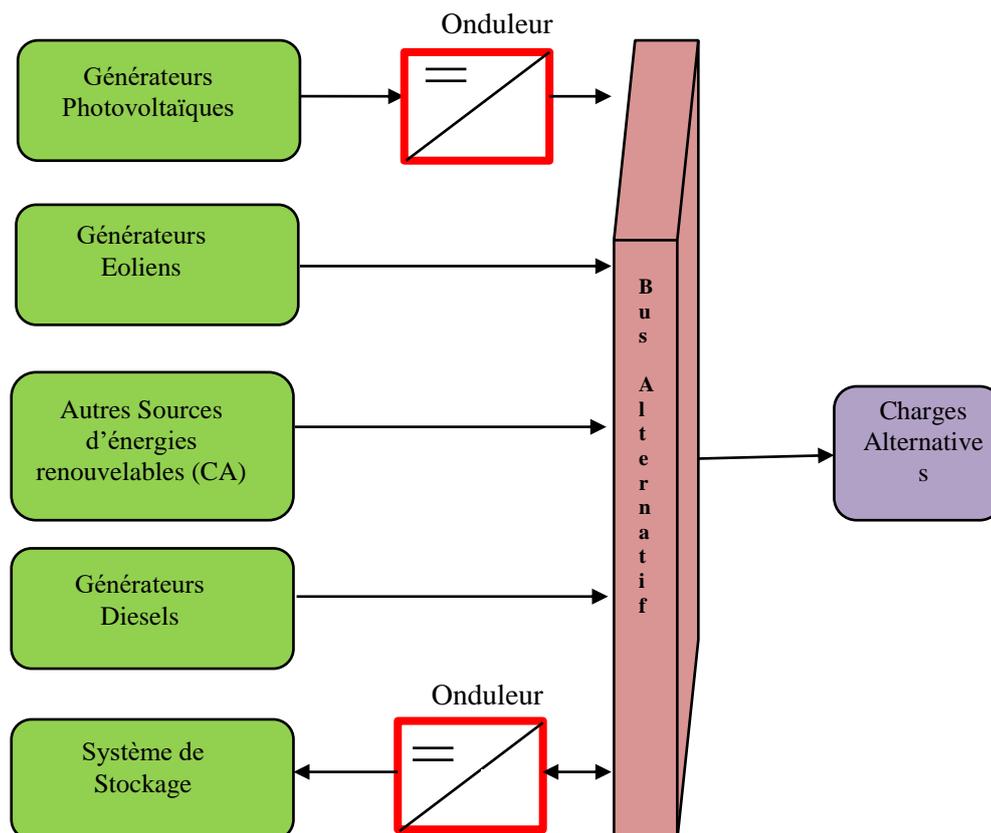


Figure I.9 : Configuration du système hybride à bus alternatif [26]

I.3.3.3. Avantages et inconvénients de chaque architecture :

Pour ce faire , il faut connaitre les avantages et les inconvénients de chaque couplage :

Tableau I.2. Les avantages et les inconvénients des bus : DC et AC.[23, 35] :

Couplage du bus	Avantages	Inconvénients
DC	<ol style="list-style-type: none"> 1. Synchronisme n'est pas nécessaire. 2. Moins de pertes de transmission 3. Connexion à un seul câble 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Des problèmes de compatibilité de tension 2. Problèmes de corrosion avec les électrodes DC. 3. Connexion non standard nécessite des coûts élevés dans l'installation et la maintenance
AC	<ol style="list-style-type: none"> 1. Il peut être facilement isolé à partir du système en cas où des sources tombent en panne. 2. Connexion au réseau facile. 3. Interface standard et la structure modulaire. 4. Multi-tension facile. 5. Bien d'établir dans le coté économique 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Synchronisme nécessaire. 2. Le facteur de puissance et le facteur des harmoniques de distorsion sont nécessaires. 3. Les pertes de transmission sont plus élevées. (Spécialement pour les longues distances)

I.3.4. 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 [29] :

- **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 (1.1).

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

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 [29].

- **Le cout d'énergie produite :**Diverses approches sont utilisées pour le calcul du cout : il dépend de l'énergie demandée par le consommateur, du cout 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[29, 37]

I.3.5. Systèmes hybrides avec source conventionnelle :

I.3.5.1. Systèmes photovoltaïque/source conventionnelle :

Ce type de système hybride est utilisé le plus souvent dans des sites qui se caractérisent par un climat chaud ou le potentiel solaire est important. L'objectif de ces systèmes lorsqu'ils fonctionnent en mode autonome, est d'alimenter sans interruption une maison, un bâtiment de logements, ou un petit village. D'autres systèmes alimentent des centres de recherche ou sont également connectés au réseau électrique. Les systèmes autonomes contiennent souvent des batteries mais aussi d'autres dispositifs de stockage. Les batteries et le champ photovoltaïque produisent du courant continu. Par contre, les moteurs diesel peuvent entraîner des générateurs continus ou alternatifs. On distingue différentes structures de systèmes selon le type de la machine électrique couplée avec le moteur diesel [33].

- La première configuration est la connexion série. Dans ce cas, le générateur diesel est connecté sur le bus 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 Fig I-10.

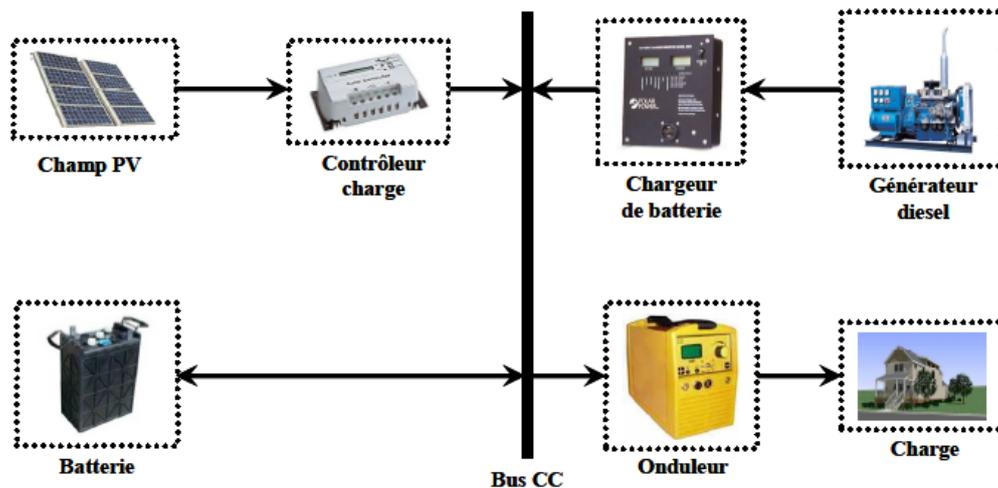


Figure I.10. Système hybride avec connexion série [15]

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 [33].

- La deuxième configuration d'un système hybride photovoltaïque/source conventionnelle est à connexion parallèle. Ici le générateur diesel est interconnecté sur le bus alternatif.

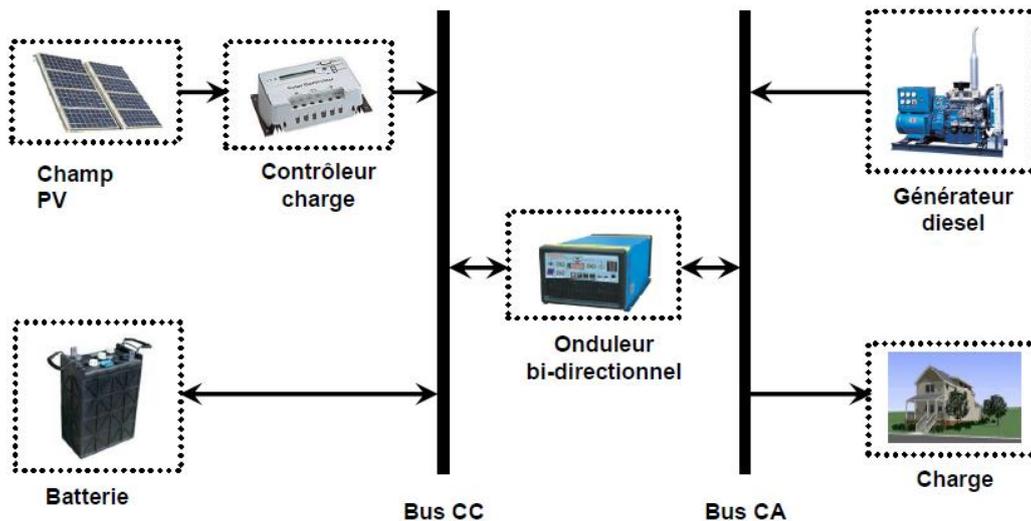


Figure.I.11 Système hybride avec connexion parallèle [35]

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 Fig.I-11 .

1.3.5.2. 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 (Fig.1-12). 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 [41]. Certains travaux traitent de modélisation et d'analyse, d'autres de dimensionnement et d'optimisation des composants du système. Le critère d'optimisation le plus souvent utilisé est la probabilité de perte d'alimentation, calculé à partir des résultats de systèmes hybrides implantés dans des centres de recherche. La stratégie de gestion de l'énergie a été étudiée par Uzunoglu et al (2009) et Kaushika et al (2005) [33, 38].

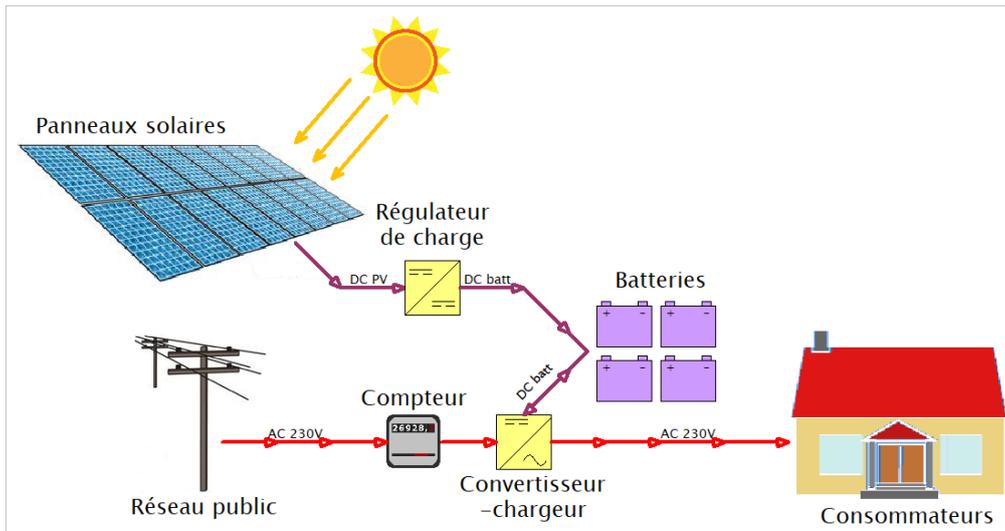


Figure .I.12 . Système hybride photovoltaïque/stockage [35]

I.4. Principes de production de l'énergie photovoltaïque :

I.4.1. Principe de fonctionnement de photovoltaïque :

La centrale (figure I-13) est constituée d'éléments photovoltaïques, appelés couramment panneaux solaires. Elle est composée d'autres éléments comme les onduleurs, les transformateurs et le poste de livraison. Des aménagements annexes permettent sa surveillance et sa maintenance. La partie active des modules, qui génère un courant continu d'électricité lorsqu'ils sont exposés à la lumière, est constituée de cellules de silicium poly cristallin d'une puissance de 220 Wc [16].

Les modules sont montés inclinés de 25° sur des châssis pour former des tables organisées en rangées, exposées au sud, les supports (une rangée de pieds) étant simplement implantés sur le terrain naturel. Le bord inférieur des tables est à 75 cm du sol, et le bord supérieur à 2,15 m. Les rangées de plateaux sont espacées de 4 mètres, afin d'éviter qu'une rangée ne fasse de

l'ombre sur celle qui est derrière. Les pieds sont fixés au sol par l'intermédiaire de pieux vissés ou battus, jusqu'à une profondeur de 150 à 200 cm.

Un panneau solaire est un dispositif convertissant une partie du rayonnement solaire en énergie thermique ou électrique, grâce à des capteurs solaires thermiques ou photovoltaïques respectivement [4].

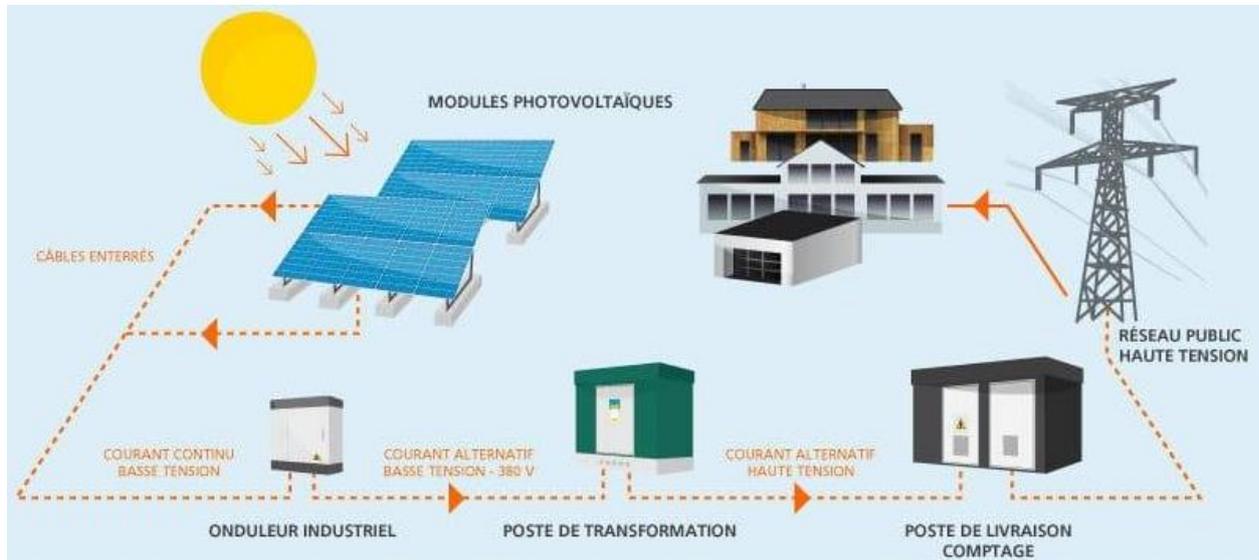


Figure I.13 Fonctionnement générale d'une installation solaire photovoltaïque [12]

I.4.2 La photopile :

Cette photopile, qu'on appelle aussi cellule solaire ou photovoltaïque (Figure I-14), est fabriquée à l'aide de matériaux semi-conducteurs comme les transistors ou les puces dans un ordinateur. Comme une pile chimique (c'est-à-dire une batterie), la cellule photovoltaïque produira de l'électricité à courant continu (cc), mais son énergie produite sera fonction principalement de la lumière reçue par la photopile [11, 12]

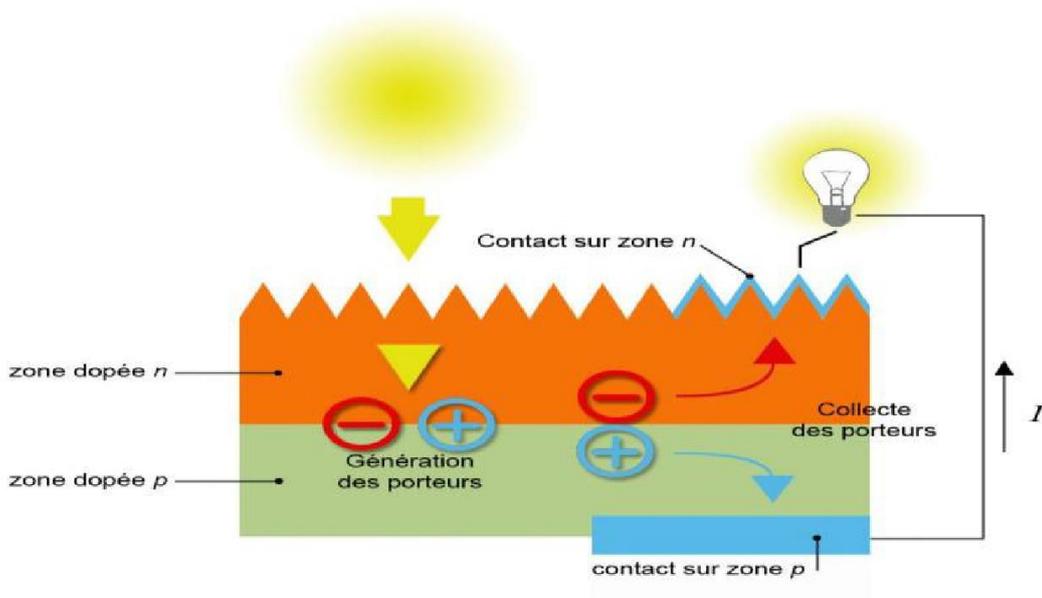


Figure I.14 : Principe de fonctionnement de la cellule PV [16]

Caractéristiques de la cellule photovoltaïque : Le Schéma équivalent simplifié d'une cellule photovoltaïque est illustré dans la figure I.15. Pour cette cellule on a :

$$I(V) = I_p(\Phi) - I_d(\Phi) \dots\dots\dots (I.2)$$

Ou : $I(V)$: courant disponible ; V : tension aux bornes de la jonction et $I_p(\Phi)$: courant produit par la photopile (ce courant est proportionnel au flux lumineux).

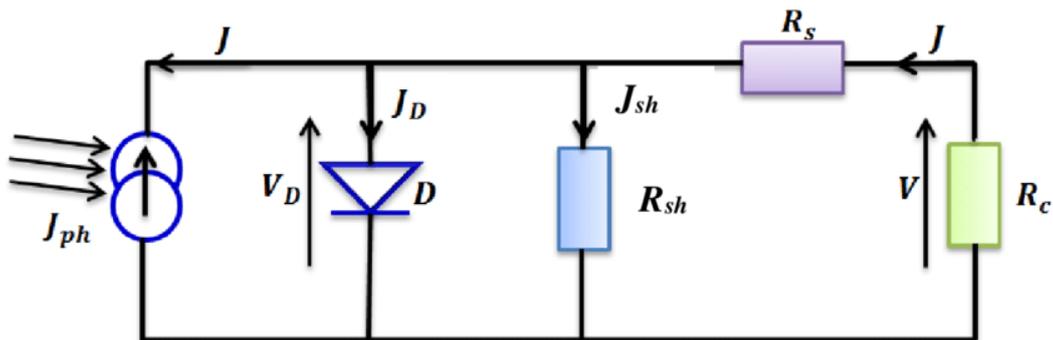


Figure I.15 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque [11]

Une photopile comporte en réalité une résistance série (R_s) et une résistance en dérivation ou shunt (R_{sh}). Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique $I(V)$ de la photopile.

I.4.3. Le module photovoltaïque :

Afin d'augmenter la tension d'utilisation, les cellules PV sont connectées en série. La tension nominale du module est habituellement adaptée à la charge de 12 volts et les modules auront donc généralement 36 cellules. De plus, la fragilité des cellules au bris et à la corrosion exige une protection envers leur environnement et celles-ci sont généralement encapsulées sous verre ou sous composé plastique. Le tout est appelé un module photovoltaïque. Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation [13].

I.4.4. Générateur Photovoltaïque :

Pour assurer les exigences de la charge, il est parfois nécessaire de brancher plusieurs modules photovoltaïques en série et/ou parallèle. Cet ensemble est appelé le champ de modules PV ou le générateur photovoltaïque (GPV). [11, 13]



Figure I.16 : Générateur photovoltaïque [11] [13]

I.5. Les pile à combustibles :

Une pile à combustible est un convertisseur électrochimique qui transforme directement l'énergie chimique de la réaction entre un combustible (généralement l'hydrogène) et un comburant (généralement l'oxygène de l'air) en énergie électrique. Dans le cas d'une pile "hydrogène/oxygène", la réaction globale est donnée par l'équation (I.3). Le bilan de la réaction finale est la production d'électricité, d'eau et de chaleur [32].



Une pile à combustible est constituée d'un empilement d'éléments anode-électrolyte cathode reliés par l'intermédiaire d'inter connecteurs (ou plaques bipolaires) formant ainsi un « stack» (ou module) comme illustré à la figure (I-17) [61].

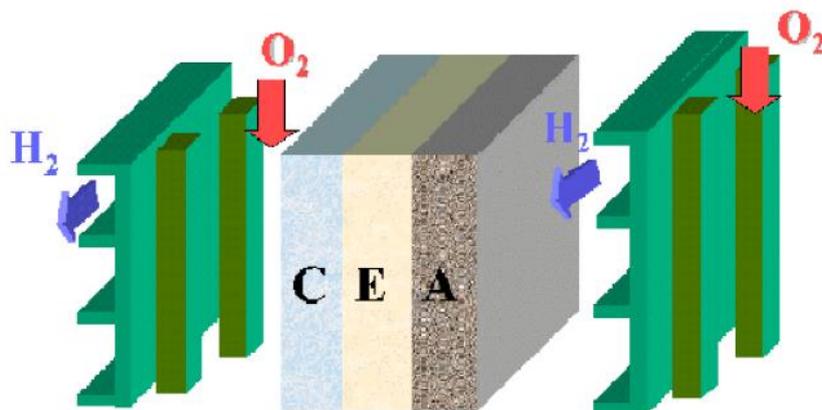


Figure I.17: Schéma de principe d'un assemblage de cellules élémentaires
Cathode/Électrolyte/Anode et inter connecteurs.

I.5.1. Différents types de pile à combustible et leurs caractéristiques :

Différentes familles de piles à combustible ont été développées. Les piles sont classées selon la nature de leur électrolyte et leur température de fonctionnement. Nous pouvons distinguer six types de pile soit [30,44,23] :

- Les piles à membranes polymère échangeuse de protons (**PEMFC** Proton Exchange Membranes Fuel Cell)
- Les piles au méthanol direct (**DMFC** Direct Methanol Fuel Cell)
- Les piles à acide phosphorique (**PAFC** Phosphoric Acid Fuel Cell)
- Les piles alcalines (**AFC** Alkaline Fuel Cell)
- Les piles à oxydes solides (**SOFC** Solid Oxide Fuel Cell)

- Les piles à carbonates fondus (MCFC Molten Carbonate Fuel Cell)

Le tableau I-4 regroupe les principales caractéristiques des différentes technologies de pile à combustible :

Tableau I.4 : Les différents types de pile à combustible [44]

	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	Siemens Hitachi Sanyo	Siemens Ifc (onsi) Fuji	Siemens Fuji Zevco Ifc	Siemens- Westinghouse Sulzer	IFC Hitachi Fuji

I.5.2. Principe de fonctionnement :

Le principe de fonctionnement d'une PAC PEM correspond au principe inverse de l'électrolyse de l'eau. Ainsi, là où l'électrolyse de l'eau le dissocie en deux éléments constitutifs, hydrogène et oxygène, la PAC les réunit de manière électrochimique pour produire de l'électricité, rejetant de ce fait de l'eau [23].

Une cellule de PAC comporte deux électrodes. L'électrode négative est le siège de la rédaction d'oxydation du carburant, généralement l'hydrogène. Du côté de l'électrode positive a lieu la réaction de réduction du comburant, généralement l'oxygène. Les faces des électrodes sont recouvertes par un catalyseur à base de platine qui favorise les réactions d'oxydoréduction [46]. Les deux électrodes sont séparées par un électrolyte (la membrane). Les protons d'hydrogène circulent de l'anode à la cathode à travers elle. Comme les électrons ne peuvent

traverser cette membrane, ils circulent (sous la forme d'un courant électrique) par un circuit externe pour atteindre la cathode et produisent ainsi de l'électricité [32].

La cathode est alimentée en oxygène, qui se combine ensuite avec les protons pour former de l'eau. L'ensemble électrode négative – électrolyte – électrode positive constitue le cœur de la pile. L'alimentation de celui-ci en réactifs se fait par l'intermédiaire de plaques distributrices. Le carburant et le comburant sont fournis à la pile dans des conditions de pression, température, hygrométrie et pureté définies, de façon continue pour assurer la production du courant [32].

Le principe de fonctionnement de la pile à combustible peut être résumé par le schéma suivant :

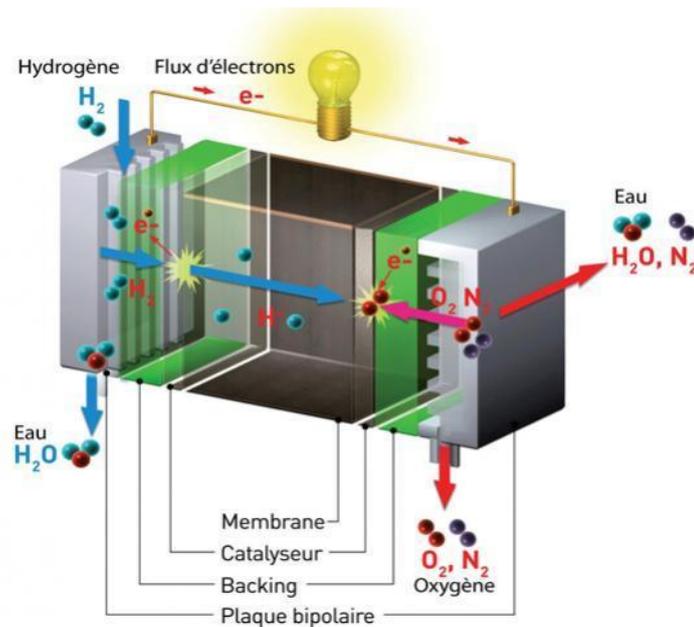


Figure I.18 : Schéma de principe d'une pile à combustible PEMFC [44]

I.5.3. Eléments de base d'une cellule élémentaire de pile PEM :

La cellule de base d'une pile à combustible (figure I.19) 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 [23].

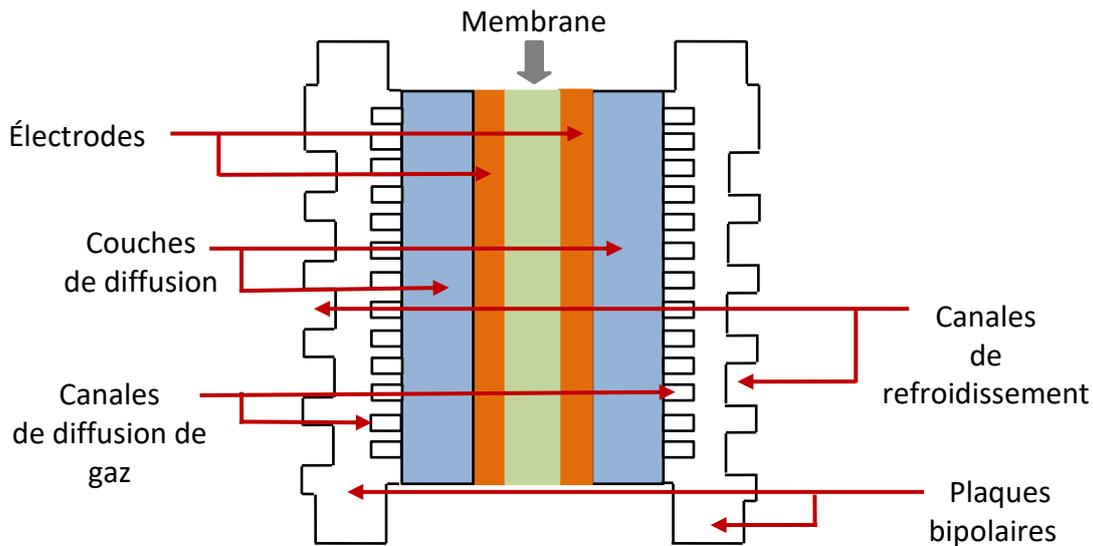


Figure I.19 : Élément de base d'une cellule de pile à combustible PEM [44].

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 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.36). L'architecture des canaux et des circuits de refroidissement fait encore l'objet de nombreuses études. Les plaques bipolaires servent aussi à collecter le courant et à assurer la mise en série électrique des cellules [23].

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 [23].

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) [46].

D. Relation tension / courant

Le principe de la réaction électrochimique est de maintenir les deux réactifs (H₂ et O₂) dans deux compartiments étanches (anode et cathode) et de permettre la réalisation de deux demi réactions d'oxydoréduction grâce d'une part à l'électrolyte et d'autre part au circuit électrique constitué par la charge. Ceci va permettre de récupérer de travail sous forme électrique, le reste étant forcément libéré sous forme de chaleur (principe de Gibbs). Bien évidemment d'autres phénomènes vont s'ajouter et les pertes associées vont diminuer la part théorique de ce travail électrique. L'équation de Faraday relie l'énergie de Gibbs ΔG à la différence de potentiel entre les deux électrodes de la cellule [31] :

$$\Delta G = -nF\Delta E \dots \dots \dots (I.4)$$

Ou :

n : est le nombre d'électrons échangés par la réaction.

F : la constante de Faraday (96 485 Coulomb).

Lorsque le courant croit, on obtient une caractéristique statique tension - courant, dite courbe $V(I)$ de polarisation, qui montre la tension de sortie en fonction de la densité de courant et dont la forme générale dépend des conditions opératoires de la pile (la température de fonctionnement, la pression, la présence de polluants, la bonne répartition du catalyseur, l'état de la membrane et son hydratation, l'état de la couche de diffusion amenant les réactifs aux électrodes...). Selon la densité de courant prélevée, la tension réelle fournie par une cellule est plus ou moins inférieure à cette tension idéale [50]. Ceci est dû aux diverses irréversibilités se produisant dans ce réacteur électrochimique. On en dénombre trois principales, chacune d'elles réduisant la tension [23, 44]

$$V_{PAC} = V_{Th} - V_{act} - V_{Ohm} - V_{conc} \dots \dots \dots (I.5)$$

Ou :

V_{act} : représente les pertes d'activation,

V_{ohm} : les pertes ohmiques.

V_{conc} : les pertes dues aux phénomènes de concentrations et de transport de masses.

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 [36].

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

Tableau I.3 : Caractéristiques des différentes technologies de stockage [42,43]

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)

I.6.1. Les Batteries

Le stockage d'énergie est généralement réalisé grâce aux batteries. Les batteries sont, d'habitude, du type plomb-acide. Les batteries nickel-cadmium sont rarement utilisées. Il y a d'autres formes de stockage, mais peu utilisées, comme le pompage de l'eau, les volants d'inertie et le stockage de l'hydrogène [36].

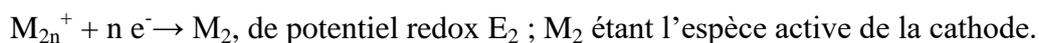
I.6.1.1. Principe général de fonctionnement d'une batterie

Deux électrodes, l'une positive et l'autre négative, sont séparées par un électrolyte. Aux deux interfaces électrode-électrolyte interviennent des réactions électrochimiques [15,16].

A l'anode (électrode négative en décharge) s'opère une réaction d'oxydation selon la formule suivante :



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 :



L'électrolyte assure le transport des espèces ioniques mises en jeu dans la réaction globale d'oxydoréduction, qui s'écrit : $M_1 + M_{2n}^+ \rightarrow M_{1n}^+ + M_2$.

La force électromotrice E de ce convertisseur se calcule selon : $E = E_2 - E_1$

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 [15,16, 43]:

A) Les Accumulateurs au plomb acide :

Ces batteries sont composées de plusieurs plaques de plomb dans une solution d'acide sulfurique. La plaque consiste en une grille d'alliage de Plomb avec une pâte d'oxyde de plomb marquée sur la grille. La solution acide sulfurique et l'eau est appelée électrolyte [15, 16, 61].

B) Les Accumulateurs au Nickel- cadmium :

Le Nickel- cadmium découvert en 1899 par Jungner. Les batteries de nickel- Cadmium ont une structure physique semblable à celles du plomb- Acide. Toute fois elles sont plus chères, puisqu'au lieu du Plomb elles utilisent de l'hydroxyde de Nickel pour les plaques positives et de l'oxyde de Cadmium pour les plaques négatives. L'électrolyte est de l'hydroxyde de Potassium [61]

La batterie au nickel-cadmium est utilisée dans les applications où la fiabilité est vitale, elle a été conçue pour répondre à un besoin prolongé de stockage d'énergie dans des conditions de fonctionnement extrême et de maintenance minimale. La tension de ce type d'accumulateur varie entre 1,15 et 1,17 Volts par élément suivant l'état de charge. Le rendement énergétique est de l'ordre de 70% . [15,16]

I.7. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté divers concepts de base liés au système hybride qui combine des sources d'énergie moderne , Photovoltaïque , pile de combustible et la batterie où nous avons présenté une brève description des différents composants de base du système hybride et les outils de stockage et de conversion l'énergie.

Chapitre III

Modélisation des éléments du système 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. Le système proposé dans cette étude est un système hybride multi-source avec le système de stockage, il est constitué par : Un générateur photovoltaïque, une pile à combustible et une batterie.

Dans notre travail nous présenterons la modélisation des différentes parties d'un système hybride, afin de pouvoir comprendre son fonctionnement, faciliter son dimensionnement et éventuellement simuler par la suite son évolution.

II.2 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

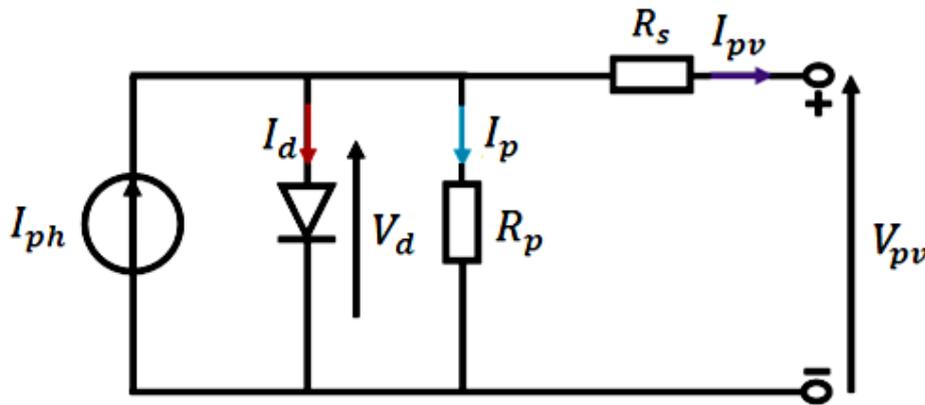


Figure. II.1. Circuit équivalent d'une cellule solaire photovoltaïque.

Un modèle de circuit équivalent de base d'une cellule PV est illustré à la figure (II.1). Où I_{ph} est le courant généré par la lumière (LGC), I_d est le courant de la diode, I_p est le courant traversant la résistance parallèle R_p , I_{pv} est le courant net du PV cellule, V_{pv} est la tension de la cellule, V_d est la tension de la diode, R_p et R_s sont le parallèle et la série résistances de la cellule respectivement. En appliquant la loi de Kirchhoff, le courant I_{pv} est donné par [7]:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_p \quad (\text{II. 1})$$

Le courant délivré d'une jonction P-N en Silicium et le courant a ses bornes, est donnée par : (I_d et I_p) par leurs équations dans l'équation (II.2) et (II.3) respectivement.

$$I_d = I_o \left[\exp\left(\frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{a \cdot V_t}\right) - 1 \right] \quad (\text{II. 2})$$

$$I_p = \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_p} \quad (\text{II. 3})$$

On remplace ces courants (I_d et I_p) par leurs équations dans l'équation (II.1) on obtient :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{a \cdot V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_p} \quad (\text{II. 4})$$

$$V_t = \frac{K \cdot N_s \cdot T}{q} \quad (\text{II. 5})$$

Où I_0 est le courant de saturation de la diode, a est le facteur d'idéalité de la diode, V_t est la tension thermique, N_s représente le nombre de cellules connectées en série, K désigne la Constante de Boltzmann, T est la température réelle et q est la charge de l'électron.

Le courant généré par la photopile (LGC) d'une cellule photovoltaïque élémentaire est difficile à déterminer car il est influencé par les deux résistances. Les fiches techniques fournissent uniquement le courant nominal de court-circuit $I_{sc,n}$ qui est le courant maximum qui peut être généré à partir de la cellule PV. Un commun l'hypothèse utilisée dans les modèles PV est $I_{sc} \approx I_{pv}$ car dans les dispositifs pratiques, R_p est élevé et R_s est faible. Avec cette hypothèse, le courant généré par la photopile peut être exprimé comme:

$$I_{ph} = (I_{sc} + K_I \cdot \Delta_T) \frac{G}{G_n} \quad (\text{II. 6})$$

Où I_{sc} est un courant de court-circuit, $\Delta_T = T - T_n$ (T_n est la température nominale), G et G_n sont respectivement l'irradiation et l'irradiation nominale sur la surface du dispositif.

I_0 Le courant inverse de saturation de la diode s'exprime en fonction des caractéristiques du matériau et de la température comme suit :

$$I_0 = \frac{K_I \cdot \Delta_T + I_{sc,n}}{\left(\frac{V_{oc,n} + K_V \cdot \Delta_T}{a \cdot V_t}\right) - 1} \quad (\text{II. 7})$$

Où $V_{oc,n}$ est la tension nominale en circuit ouvert, K_V et K_I sont les coefficients de tension et courant respectivement.

II.2.1 Module photovoltaïque utilisé

Les constructeurs de panneaux photovoltaïques fournissent les paramètres du module ($I_{sc,n}$, $V_{oc,n}$ et P_{pv} ...) sous les conditions standard de fonctionnement (une insolation de 1000 W/m^2 et

une température de 25°C). Le tableau II.1 (voir l'annexe) montre les données d'un module photovoltaïque, de type KC200GT.

II.2.2 Caractéristiques de module photovoltaïque

Les caractéristiques électriques d'un module photovoltaïque varient en fonction de la température et de l'irradiation. Les caractéristiques courant-tension et puissance-tension du module KC200GT (voir tableau II.1 dans l'annexe) sont présentées dans les conditions standards de fonctionnement (une insolation de 1000 W/m^2 et une température de 25°C).

D'après la figure (II.2) on peut voir 3 zones principales :

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

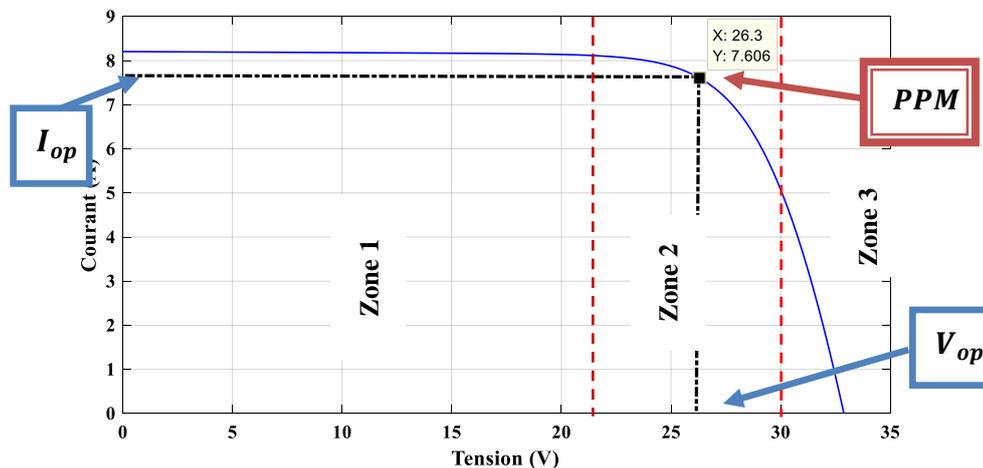


Figure. II.2. Caractéristique courant-tension d'un module photovoltaïque.

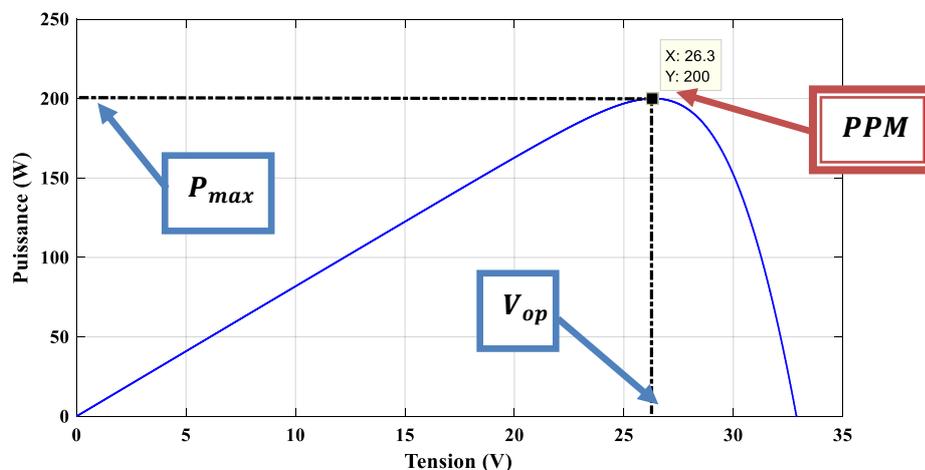


Figure. II.3. Caractéristique puissance-tension d'un module photovoltaïque.

II.2.3 Influence de la variation des conditions météorologiques sur les paramètres du module photovoltaïque

II.2.3.1 Influence de la température

Suivant les figures (II.4) et (II.5), on constate que lorsque la température augmente à irradiation constante la tension de circuit ouvert V_{oc} diminue fortement et le courant de court circuit I_{sc} augmente légèrement.

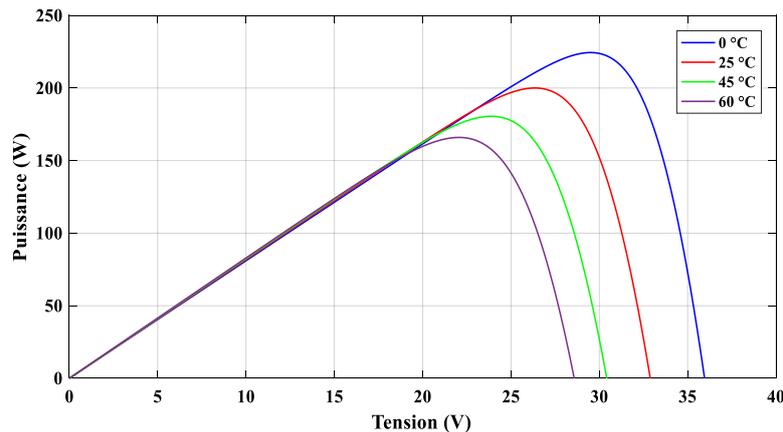


Figure. II. 4. Caractéristique puissance – tension d'un module photovoltaïque pour une variation de température et $G = 1000\text{W}/\text{m}^2$.

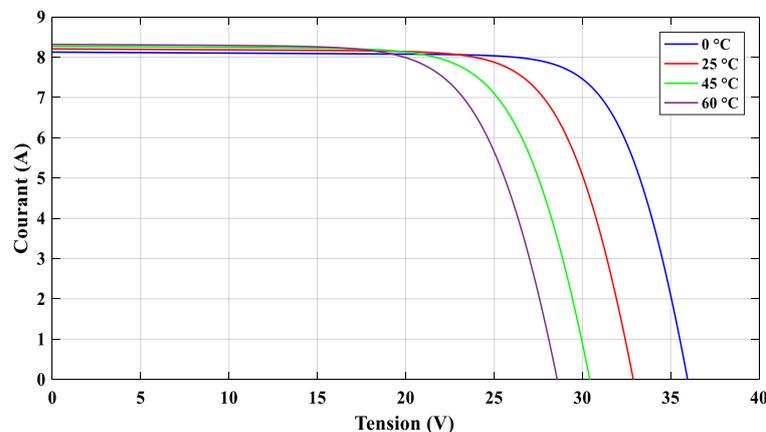


Figure. II.5. Caractéristique courant – tension d'un module photovoltaïque pour une variation de température et $G = 1000\text{W}/\text{m}^2$.

II.2.3.2 Influence de l'irradiation

Les caractéristiques des figures (II.6) et (II.7) montrent bien la variation du courant du module photovoltaïque ainsi que de la puissance en fonction de la tension pour différents niveaux d'éclairement.

On peut constater l'existence des points optimaux sur les courbes de puissance. Ces points correspondent aux points de puissances maximales lorsque l'irradiation varie pour une température donnée. On peut constater aussi que le courant de court-circuit I_{sc} varie proportionnellement à l'irradiation. D'autre part, la tension de circuit ouvert V_{oc} varie très peu.

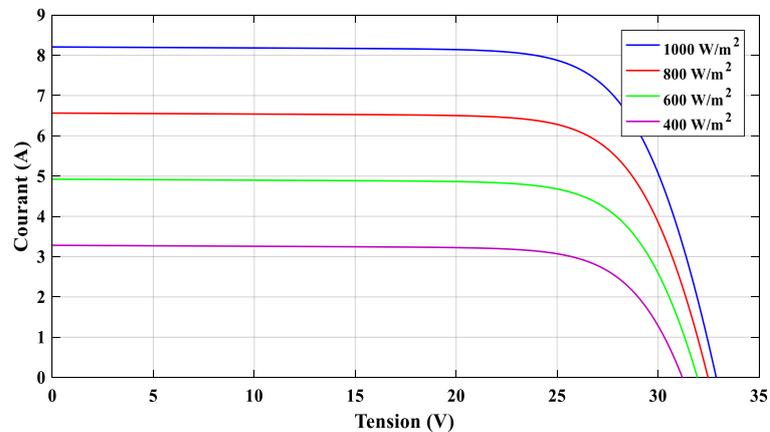


Figure. II. 6. Caractéristique courant – tension d'un module photovoltaïque pour différents niveaux d'irradiation et $T=25\text{ °C}$.

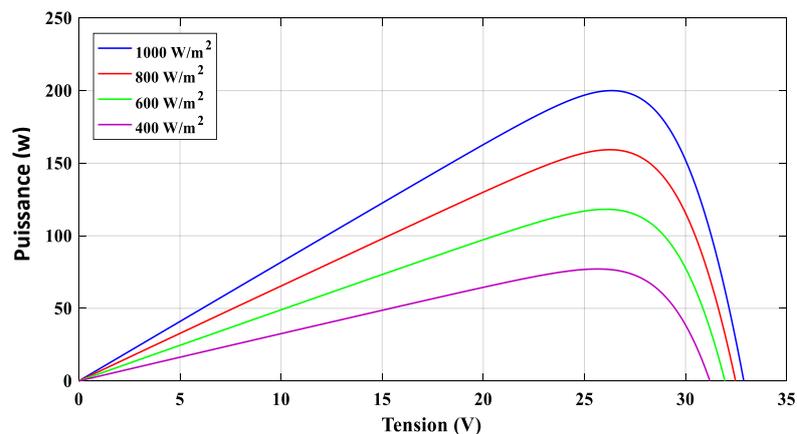


Figure. II. 7. Caractéristique puissance – tension d'un module photovoltaïque pour différents niveaux d'irradiation et $T=25\text{ °C}$.

II.2.4 Constitution d'un 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 le courant qui augmente. Généralement on utilise un montage série/parallèle qui permet de régler à la fois la tension et le courant. Les cellules sont associées entre elles en série et les modules sont associés en parallèle.

[7]

II.2.4.1 Câblage séries des cellules

Les cellules photovoltaïques peuvent se connecter en série. Les tensions de toutes les cellules s'ajoutent et le courant est le même que celui d'une seule cellule. C'est pourquoi il faut toujours des cellules de même courant pour les mettre en série. En fabrication, on appelle cela l'appairage : on trie les cellules selon leur courant pour les câbler en série. Si l'une d'elles était plus faible en courant, elle imposerait son courant à toute la série ce qui pénaliserait le module complet.

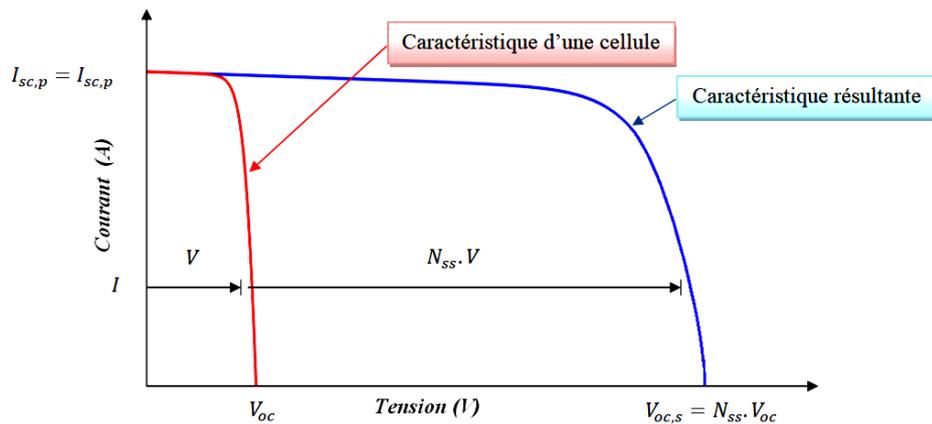


Figure. II. 8. Caractéristiques de cellules photovoltaïques en série.

II.2.4.2 Câblage parallèles des cellules

Lorsque les cellules sont connectées en parallèles, ce sont les courants qui s'ajoutent et la tension qui restera constante. Il faudra donc appairer les tensions et non les courants, lors de la mise en parallèle des modules photovoltaïques pour constituer un générateur plus puissant.

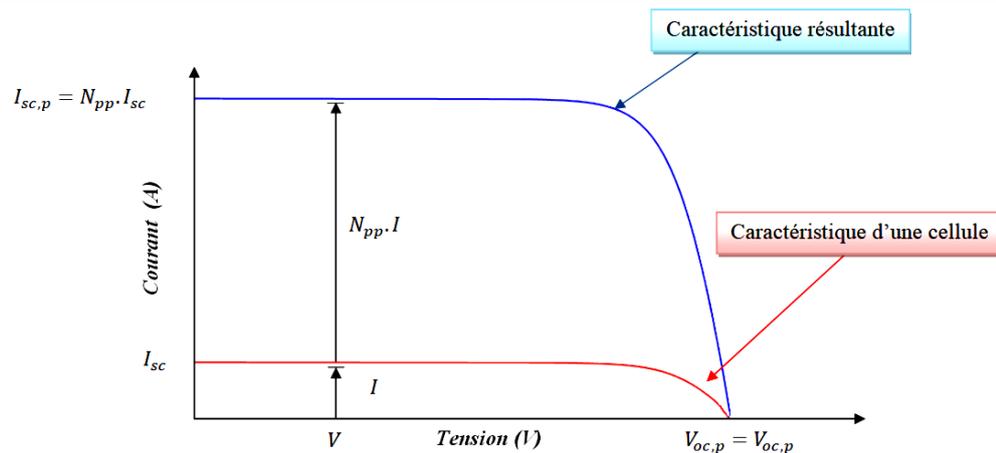


Figure. II. 9. Caractéristiques de cellules photovoltaïques en parallèle.

II.2.4.3. Association série/parallèle

Comme on a dit précédemment lors d'une association série/parallèle le problème qui se pose lorsque l'on a une cellule moins performante devient consommatrice, donc on utilise une diode by-pass pour éviter ce problème et les diodes anti-retour pour éviter le retour de courant des autres modules lors d'un dysfonctionnement.

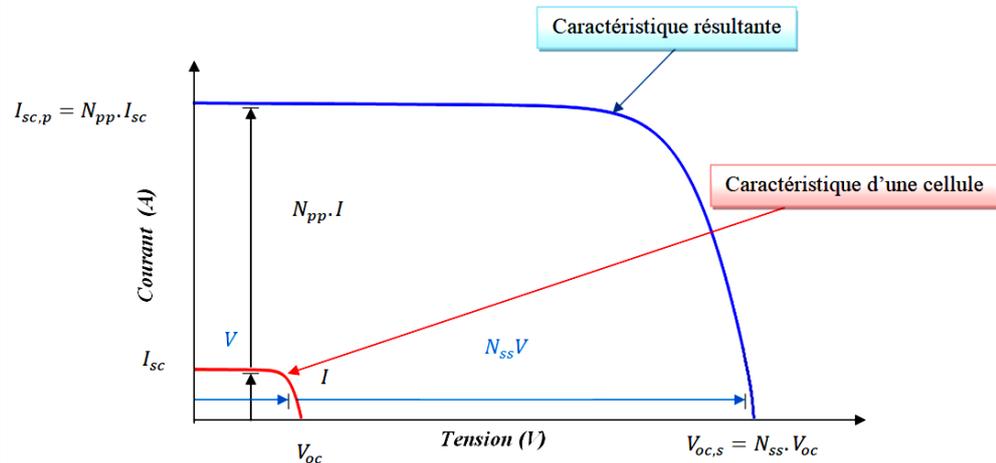


Figure. II. 10. Caractéristiques de cellules photovoltaïques en série/parallèle.

II.2.5 Protections classiques d'un générateur photovoltaïque

Lorsque nous concevons une installation photovoltaïque, nous devons assurer la protection électrique de cette installation afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement en cas d'ombrage.

Pour cela, deux types de protections sont classiquement utilisés dans les installations actuelles [8]:

- la protection en cas de connexion en parallèle de modules PV pour éviter les courants négatifs dans les GPV (diode anti-retour).
- la protection lors de la mise en série de modules PV permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode by-pass) et éviter les points chauds.

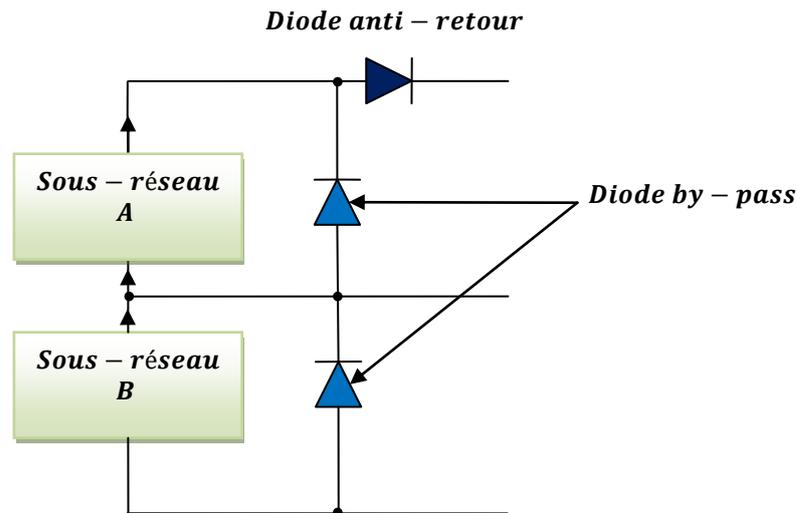


Figure. II. 11. Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour.

II.2.6 Modélisation hacheur Boost

C'est un convertisseur DC/DC parallèle inséré entre le générateur photovoltaïque GPV et la charge, connu aussi sous le nom de « Boost », elle permet d'augmenter la tension d'entrée à niveau supérieur ; son schéma de principe de base est celui de la figure (II.12).

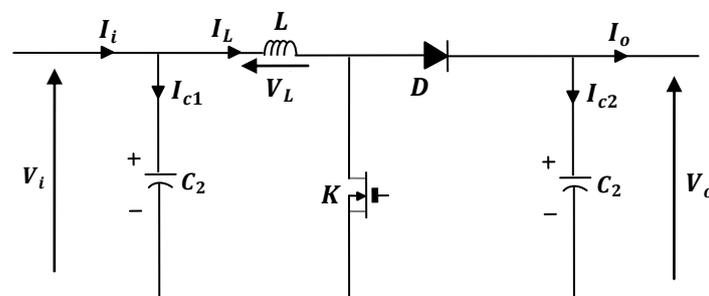


Figure. II. 12. Schéma de principe d'un convertisseur Boost.

En appliquant les lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents du convertisseur survolteur (voir figure II.13) des deux phases de fonctionnement donne [9]:

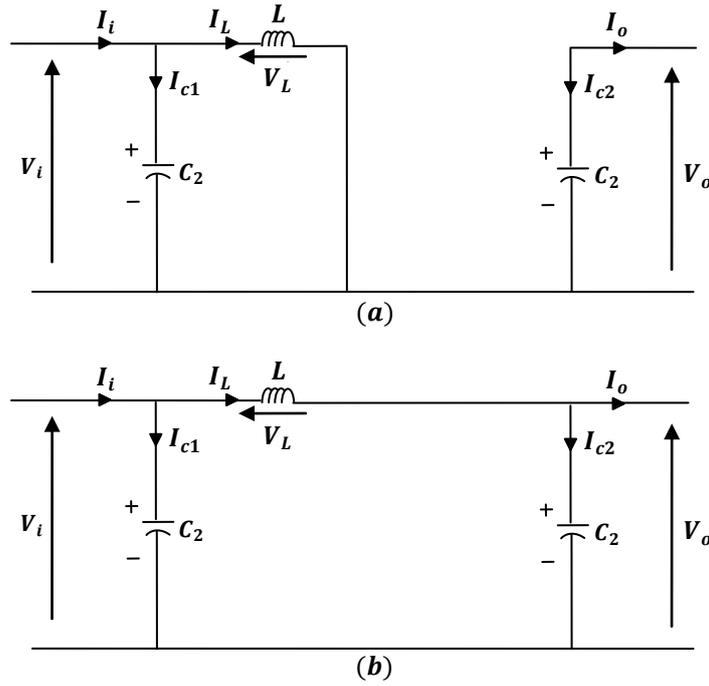


Figure. II. 13. Schémas équivalents du hacheur survolteur (a) :K fermé, (b) : ouvert.

Pour la première période $d.T_s$:

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = -i_o(t) \\ V_L = L \frac{di_L(t)}{dt} = -V_i(t) \end{cases} \quad (\text{II. 8})$$

Pour la deuxième période $(1 - d)T_s$:

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\ V_L = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \end{cases} \quad (\text{II. 9})$$

Pour trouver une représentation dynamique valable pour tout la période T_s , on utilise généralement l'expression suivante :

$$\left(\frac{dx}{dt}\right) T_s = \frac{dx}{dt} dT_s + \frac{dx}{dt(1-d)T_s} (1 - d)T_s \quad (\text{II. 10})$$

En appliquant la relation (II.10) sur les systèmes d'équations (II.8) et (II.9), on obtient les équations qui régissent le système sur une période entière

$$\begin{cases} C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} T_s = dT_s(i_i - i_L) + (1-d)T_s(i_i - i_L) \\ C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} T_s = -dT_s i_0 + (1-d)T_s(i_L - i_0) \\ L \frac{di_L(t)}{dt} T_s = -dT_s V_i + (1-d)T_s(V_i - V_0) \end{cases} \quad (\text{II. 11})$$

Après arrangement, on obtient :

$$\begin{cases} i_L = i_i - C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} \\ i_0 = (1-d)i_L - C_2 \frac{dV_i(t)}{dt} \\ V_L = L \frac{di_L(t)}{dt} + (1-d)V_0 \end{cases} \quad (\text{II. 12})$$

Où le gain de transfert de tension est :

$$G = \frac{V_0}{V_i} = \frac{1}{1-d} \quad (\text{II. 13})$$

II.2.7 MPP basée sur la méthode de perturbe et d'observe (P&O)

L'algorithme Perturbe et Observe (P&O) est la méthode de suivi couramment utilisée pour l'extraction de la maximum puissance de la source PV. L'algorithme est simple et pratique les considérations de mise en œuvre sont plus faciles [6]. Le principe de commande P&O consiste à provoquer une perturbation de faible valeur sur la tension V_{pv} , ce qui engendre une variation de la puissance. La figure (II.14) montre que si une augmentation de la tension provoque un accroissement de la puissance, le point de fonctionnement se trouve à gauche du MPP, si au contraire la puissance décroît, il est à droite [10].

De la même manière, on peut faire un raisonnement pour une diminution de la tension. En résumé, pour une perturbation de la tension, si la puissance augmente, la direction de la perturbation est maintenue. Si non, elle est inversée pour que le point de fonctionnement converge vers le MPP [10].

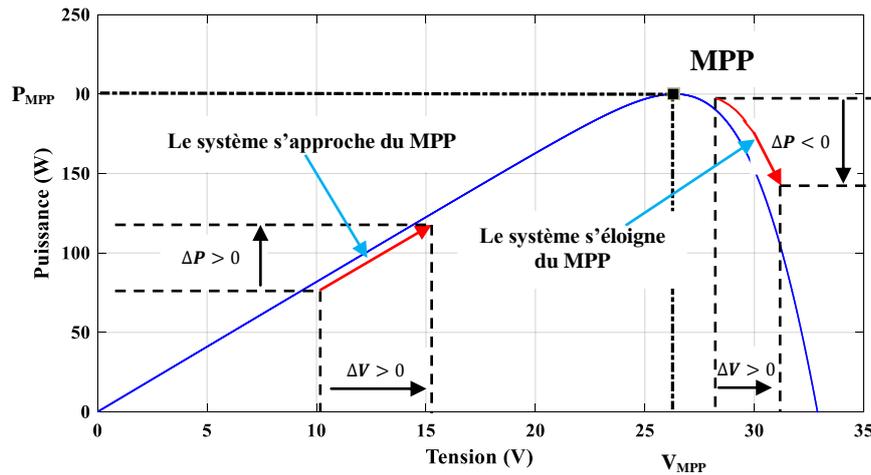


Figure. II. 14. Caractéristique puissance - tension d'un panneau photovoltaïque.

La figure (II.15) illustre l'organigramme de la commande MPP de type P&O. Pour déterminer la puissance à chaque instant, deux capteurs sont nécessaires pour mesurer les valeurs de la tension et du courant.

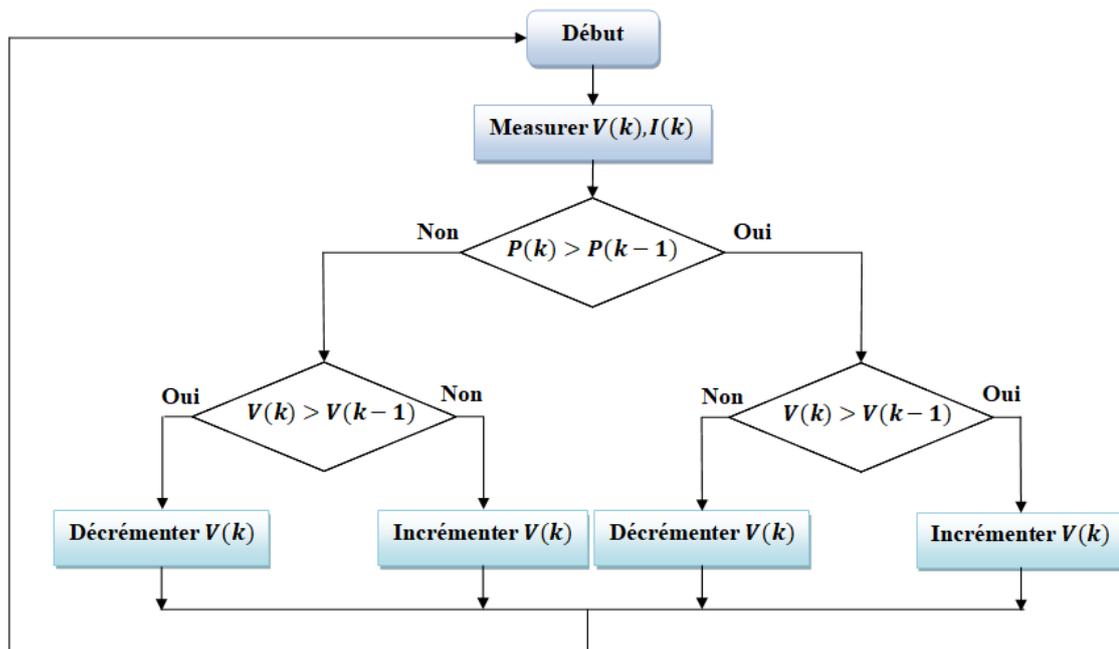


Figure. II. 15. Organigramme de l'algorithme MPP de la perturbation & observation.

II.3 Modélisation de la pile à combustible

II.3.1 Représentation électrique de la pile

De nombreux travaux proposent un modèle statique décrivant la courbe de polarisation de la PAC [20, 28, 45, 46, 48,] :

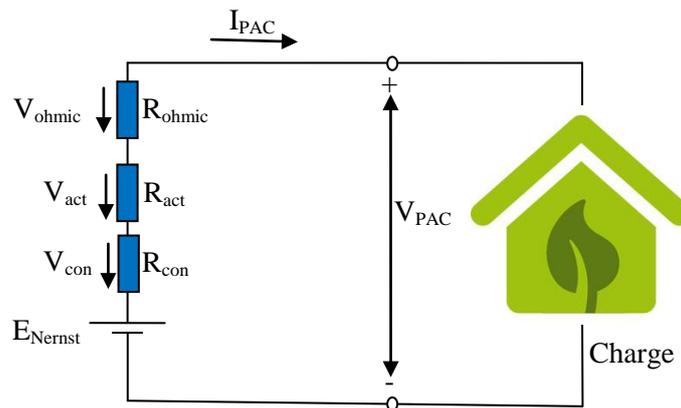


Figure II.16: Représentation électrique d’une pile à combustible

De la figure (II.25) on peut écrire [20, 28] :

$$V_{PAC} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{con} \dots\dots\dots(II.14)$$

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 [20, 28, 45, 46, 48] :

$$\begin{cases} E_{nerst} = N_0 \left[E_0 + \frac{RT}{2F} \log \left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}} \right) \right] \\ V_{ohmic} = R_m I \end{cases} \dots\dots\dots (II.15)$$

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.

$$\begin{cases} P_{O_2} = \frac{1/k_{O_2}}{1 + \tau_{O_2} s} (q_{O_2}^{in} - 2k_r I) \\ P_{H_2} = \frac{1/K_{H_2}}{1 + \tau_{H_2} s} (q_{H_2}^{in} - 2k_r I) \\ P_{H_2O} = \frac{1/K_{H_2O}}{1 + \tau_{H_2O} s} (2K_r I_{fc}) \\ q_{H_2}^{in} = \frac{1}{1 + T_f s} \left[\frac{2k_r}{U_{opt}} I_{fc} \right] \\ q_{O_2}^{in} = \frac{1}{r_{HO}} q_{H_2}^{in} \end{cases} \dots\dots\dots (II.16)$$

$q_{H_2}^{in}, q_{O_2}^{in}$ 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 [20,28, 40], $V_{act}, V_{ohmic}, V_{con}$ correspondent respectivement aux pertes d'activation, de polarisations ohmiques et de polarisations de concentration.

$$V_{act} = [\xi_1 + \xi_2 T + \xi_{3T} \times \ln(C_{O_2}) + \xi_4 T \times \ln(I)] \dots\dots\dots (II.17)$$

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 $(\text{mol} / \text{m}^3)$. Il s'exprime comme suit [28, 48]:

$$C_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{5.08 \times 10^6 e^{-\frac{498}{T}}} \dots\dots\dots (II.18)$$

La perte de polarisation ohmique est donnée par:

$$V_{ohmic} = IR_m \dots\dots\dots (II.19)$$

R_m :est la résistance ohmique

La polarisation de concentration est exprimée par:

$$V_{con} = -B \times \ln \left(1 - \frac{I}{I_{lim}} \right) \dots\dots\dots (II.20)$$

avec: I_{lim} la densité de courant où le carburant est utilisé au même taux que le taux d'entrée maximal (A / cm^2).

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 [20 , 28, 40]:

$$E_g^{FC} = H_2^{used} \zeta_{fc} \frac{H_2 \text{ heating value}}{H_2 \text{ density}} \dots\dots\dots (II.21)$$

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.3.2 Caractéristique tension/densité de courant :

La figure (II.17) illustre la caractéristique courant-tension d'une PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell). Pour une température = 25°C, par contre la figure (II.18) présente la caractéristique courant- tension pour différentes température. La tension évolue en fonction de la densité de courant et on peut distinguer trois zones [28, 48, 60] :

- ✓ 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

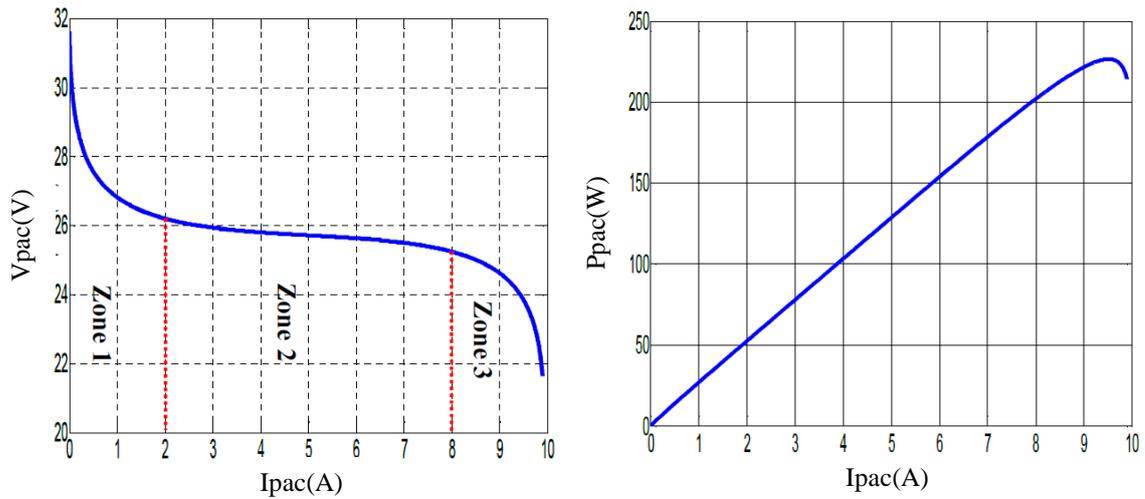


Figure II.17 : Caractéristique $V_{pac}(I_{pac})$ et $P_{pac}(I_{pac})$ à $T=25^{\circ}\text{C}$

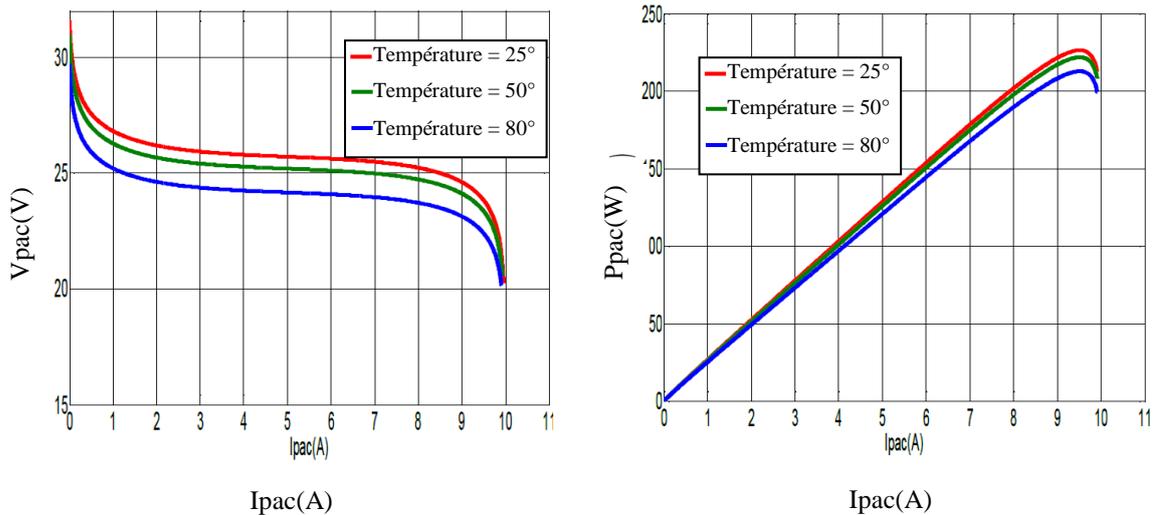


Figure II.18 : Caractéristique $V_{pac}(I_{pac})$ et $P_{pac}(I_{pac})$ pour différentes températures

II.3.3 Modélisation du hacheur boost (élevateur)

Le convertisseur Boost est un élévateur de tension, la tension de sortie est toujours supérieure à la tension d'entrée [28, 40, 47, 48]. La figure (II.19) représente la structure d'un hacheur de type Boost utilisé lorsqu'on désire augmenter la tension disponible d'une source continue.

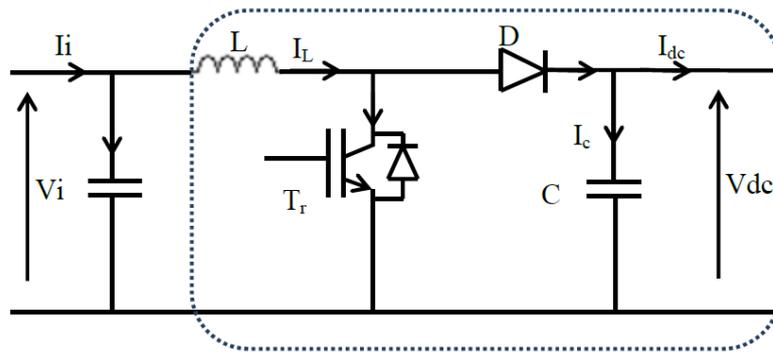


Figure II.19 : schéma de hacheur type boost

En mode de conduction continue le fonctionnement de ce convertisseur peut être divisé en deux phases selon l'état du transistor Tr.

Dans la première phase Tr est passant, la tension aux bornes de l'inductance vaut $V_L = V_i$ le courant traversant l'inductance augmente linéairement ; dans la deuxième phase le transistor est bloqué, la diode devient passante. La tension aux bornes de l'inductance vaut $V_i = V_L + V_{dc}$. Dans cette phase le condensateur C se charge en même temps par le courant stocké dans l'inductance et par le générateur [40]. Les équations électriques du hacheur boost sont :

$$V_i = L \frac{dI_L}{dt} + (1 - \alpha)V_{dc} \dots \dots \dots (II.22)$$

$$(1 - \alpha)I_L = C \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{dc} \dots \dots \dots (II.23)$$

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

$$V_{dc} = \frac{1}{(1-\alpha)} V_i \dots \dots \dots (II.24)$$

Le courant Idc est défini par la relation :

$$I_{dc} = (1 - \alpha)I_L \dots \dots \dots (II.25)$$

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

II.4 Modélisation de la batterie

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 (II.20) [1] :

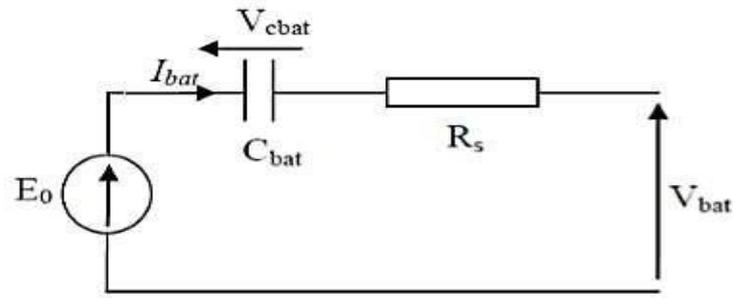


Figure II.20 : Modèle R-C de la batterie.

On a donc :

$$V_{bat} = E_0 - R_s * I_{bat} - V_{cbat} \quad (\text{II.26})$$

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

$$SOC = \left(1 - \frac{Q_{bat}}{C_{bat}}\right) * 100 \quad (\text{II.27})$$

Tel que :

$$Q_{bat} = I_{bat} * t_{bat} \quad (\text{II.28})$$

$$C_{bat} = \frac{Q_{bat}}{V_{bat}} \quad (\text{II.29})$$

On peut écrire les équations suivantes [5] :

$$E'_0 = N_s * E_0 \quad (\text{II.30})$$

$$C'_0 = \frac{N_p}{N_s} * C_{bat} \quad (\text{II.31})$$

$$R'_s = \frac{N_p}{N_s} * R \quad (\text{II.32})$$

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

$$C_{bat} = \frac{E_{bat} * N_i}{V_{bat} * y_{bat} * D} \quad (\text{II.33})$$

II.4.1 Modélisation du convertisseur DC/DC (Back –Boost)

II.4.1.1 Fonctionnement d'un convertisseur DC/DC (Back –Boost)

Un convertisseur Buck-Boost est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible ou plus grande valeur, mais de polarité inverse. Un inconvénient de ce convertisseur est que son interrupteur ne possède pas de borne reliée au zéro, compliquant ainsi sa commande [3].

La Figure (II.21) représente Montage de Back/Boost du convertisseur DC-DC

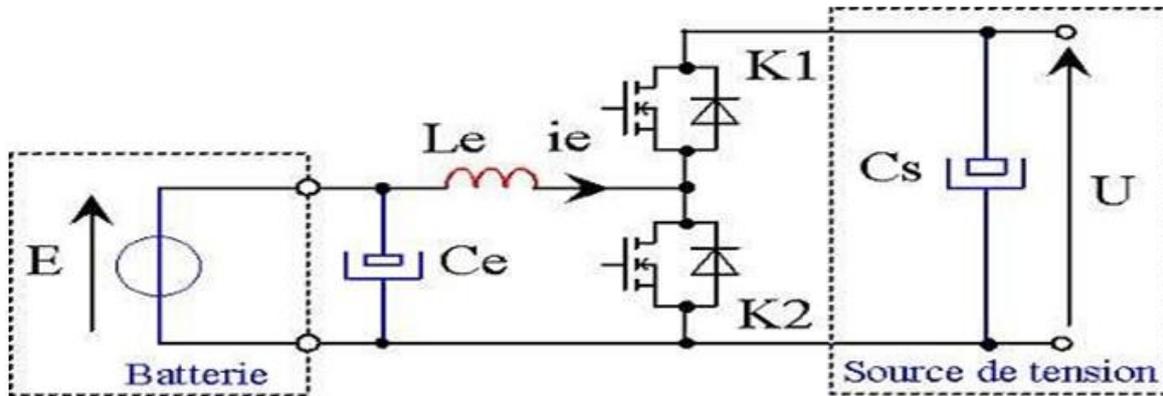


Figure II.21 : Montage de Back/Boost du convertisseur DC-DC.

Les équations électriques du hacheur Boost sont :

$$L \frac{di_L}{dt} = V_{bat} - (1 - \alpha) U \quad (II.34)$$

$$C_s \frac{dv_{dc}}{dt} = (1 - \alpha) I_L - I_{dc} \quad (II.35)$$

Les équations électriques du hacheur Buck sont :

$$L \frac{di_L}{dt} = V_{bat} - \alpha * U \quad (II.36)$$

$$C_s \frac{dv_{dc}}{dt} = \alpha * I_L - I_{dc} \quad (II.37)$$

II.4.1.2 Calcul des paramètres de L et C du convertisseur

Pour calculer des paramètres L et C se fait grâce aux expressions suivantes :

$$L = \frac{V_{dc}}{4 * f * \Delta I_L} \quad (II.38)$$

$$C_s = \frac{\Delta I_L}{8 * f * \Delta V_{dc}} \quad (II.39)$$

II.5 Modélisation du bus continu

Généralement dans la modélisation, le bus continu est considéré comme une capacité. Une fois tous les modèles élémentaires sont décrits, nous avons effectué le couplage des sources selon la configuration à bus continu. La puissance fournie par chaque source est centralisée sur le bus à courant continu comme le montre la figure (II.22) .

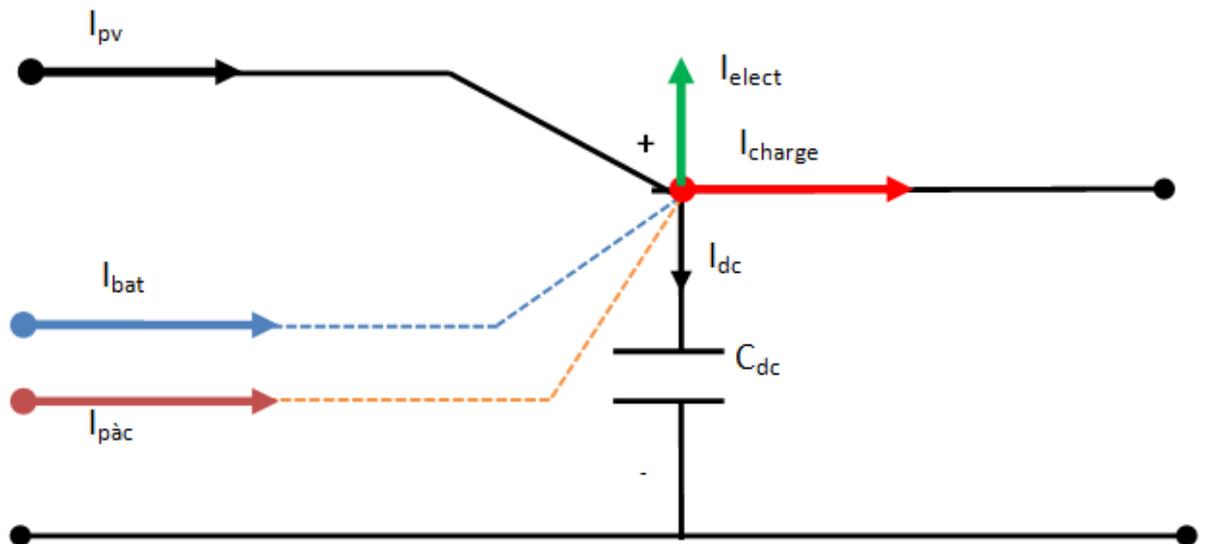


Figure.II.22 : Modèle du bus continu

Le courant dans le bus continu est donné par :

$$I_{dc} = C \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (\text{II. 40})$$

$$I_{dc} = I_{pv} + I_{pac} \pm I_{batt} - I_{charge} - I_{elect} \quad (\text{II. 41})$$

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.

II.5.1 Estimation de la valeur de la tension du bus continu

Il est important de fixer la tension du bus continu V_{dc} à une valeur de référence. Il faut que la tension du bus continu soit supérieure à la valeur maximale (valeur crête) de la tension composée côté alternatif de l'onduleur.

Pour un coefficient de réglage maximal ($m_a = 1$), l'expression de V_{dc-ref} s'écrit [Cha'10] :

$$V_{dc-ref} = 2\sqrt{2} \cdot V_s \quad (\text{II. 42})$$

Avec V_s : la valeur maximale de la tension de phase à la sortie de l'onduleur ($V_s = 230 \text{ V}$).

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modélisé un système électrique hybride ou nous avons abordé chaque partie du système hybride (panneau solaire, batterie, pile à combustible et les convertisseurs).

Cette modélisation nous permettra de simuler les performances des différentes parties d'un système hybride alimentant une charge.

Chapitre III

Simulation et gestion des éléments du système hybride

III.1 Introduction

Après la modélisation des différentes parties d'un système hybride dans le chapitre précédent, dans ce chapitre nous allons simuler chaque partie de système globale (GPV, pile à combustible et la batterie). Nous allons faire la simulation du système étudié sous Matlab-Simulink pour obtenir les différentes courbes du système et la présentation des résultats.

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

L'architecture complète du système multi-source étudié dans le cadre de notre travail est illustrée dans la figure III.1. Le système d'énergie hybride autonome proposé est composé de la combinaison de trois sources d'énergie : photovoltaïque, éolienne, pile à combustible plus le système de stockage. Tous ces éléments sont connectés à un bus DC d'une tension nominale de 450 V, afin d'alimenter les charges continues et alternatives. Un onduleur triphasé assure l'interfaçage de la charge AC avec le bus DC. Selon la figure III.1, nous avons :

- ✚ Le système PV se compose d'un panneau photovoltaïque connecté au bus DC via un hacheur du type buck-boost qui permet d'obtenir le maximum de puissance du GPV grâce à l'utilisation d'un algorithme MPPT.
- ✚ La pile à combustible est liée au bus DC par un hacheur de type boost.
- ✚ La batterie est reliée au bus DC à travers un convertisseur réversible en courant, il contrôle l'intensité du courant délivré ou consommé par la batterie tout en assurant une adaptation de la tension entre la batterie et le bus DC.

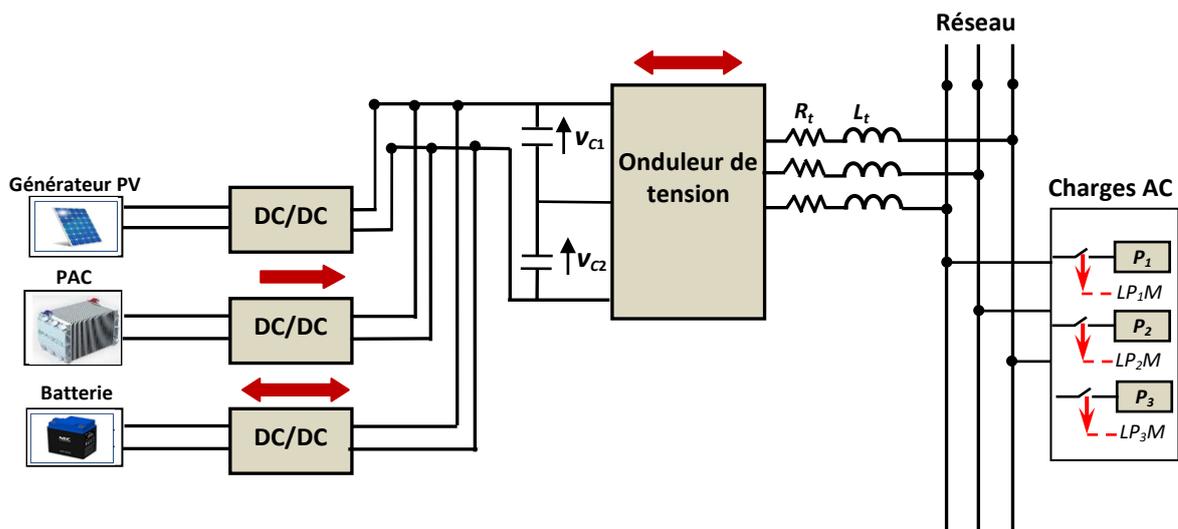


Figure III.1. Schéma synoptique du système hybride étudié connecté à une charge alternative

III.3. Contrôle de la chaîne photovoltaïque

III.3.1 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.2, 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 [64]. 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.

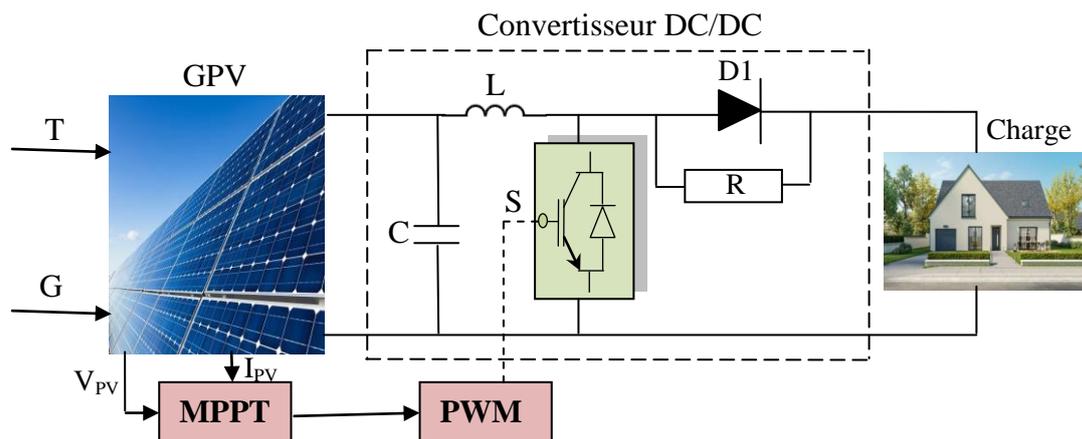


Figure III.2: Convertisseur boost avec contrôle MPPT

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, où 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 [65].

III.3.2 Résultats de simulation

Dans cette partie, nous présentons les résultats de la simulation du générateur PV connecté à un hacheur boost commandé par MPP-P&O, évalué à l'aide du logiciel MATLAB / SimPowerSystem. Les paramètres du système proposés sont répertoriés dans le tableau III.1

(voir l'annexe).

III.3.2.1 Données météorologiques nominales

Dans ce teste, nous avons considéré que à une valeur de 298 K.

Le système photovoltaïque génère une faible tension, il est donc nécessaire d'utiliser un hacheur survolteur (Boost) afin d'augmenter cette tension pour quelle être exploitable.

Les résultats de simulation du convertisseur survolteur représentent par les figures (III.3), (III.4). Ces figures représentent les tensions d'entrée et de sortie d'hacheur survolteur ainsi le courant de sortie d'hacheur.

Ces résultats montrent que la tension de sortie d'hacheur survolteur est supérieure à celle d'entrée avec une démunissions du courant. Donc l'hacheur survolteur effectue correctement son rôle.

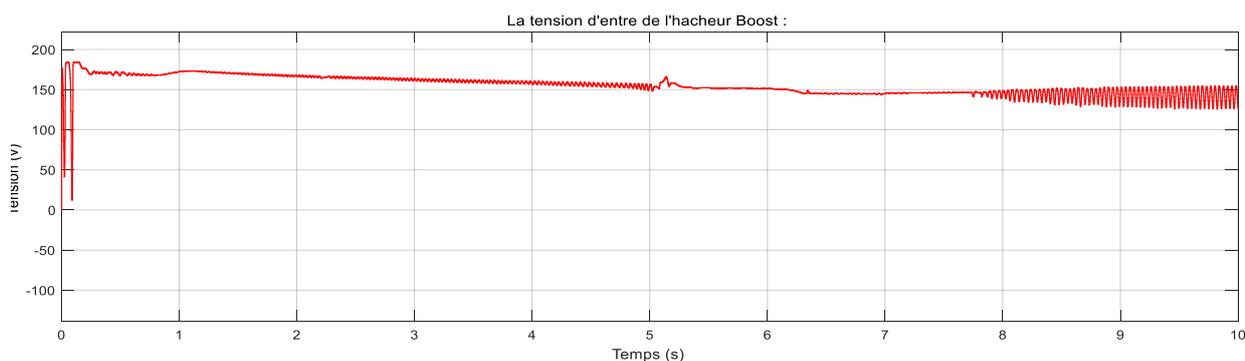


Figure. II. 3. Tensions d'entré de l'hacheur boost

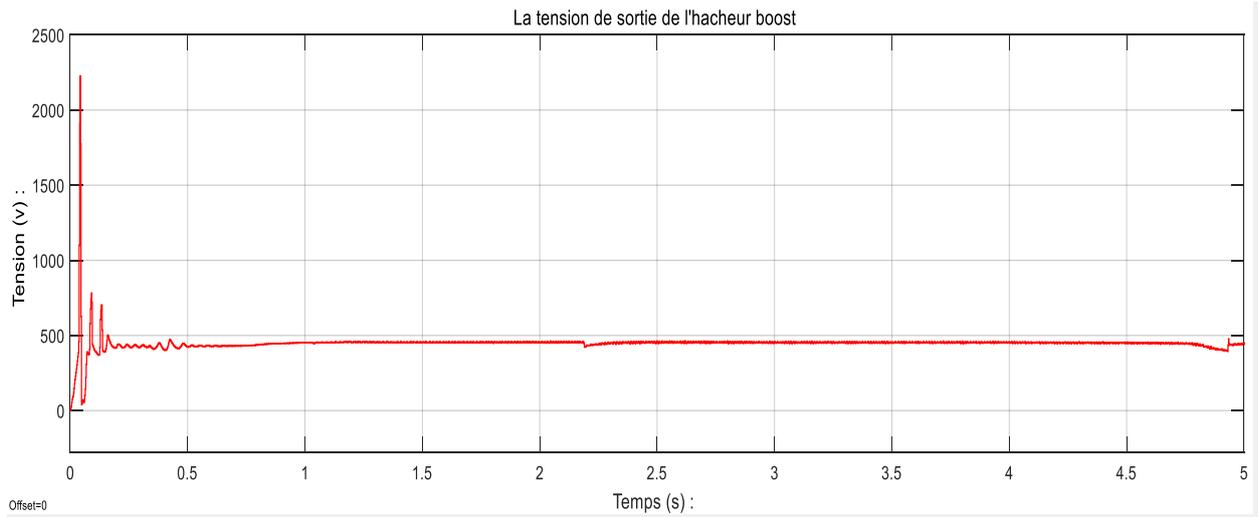


Figure. II. 4. Tensions de sortie de l’hacheur boost

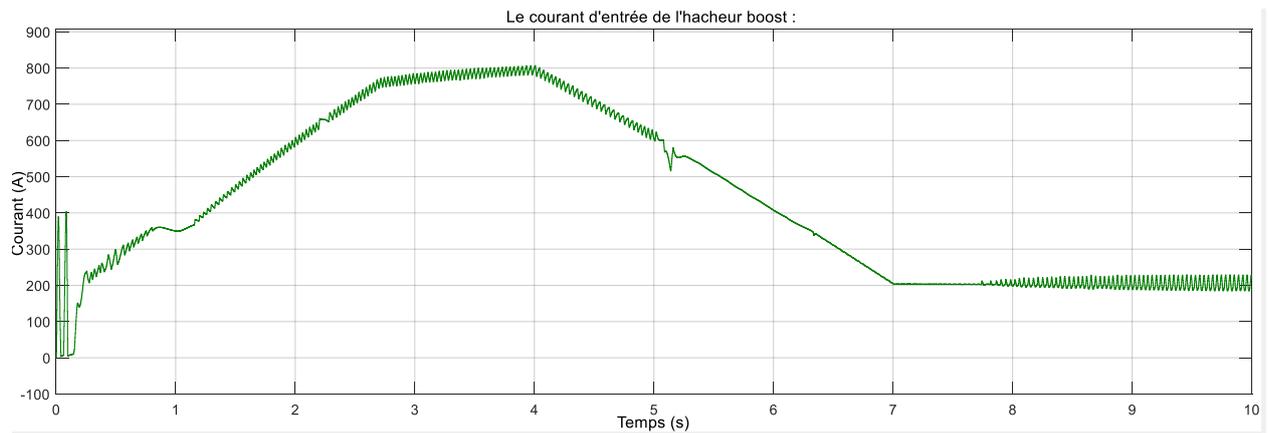


Figure. II. 5. Courants d’entrée de l’hacheur boost.

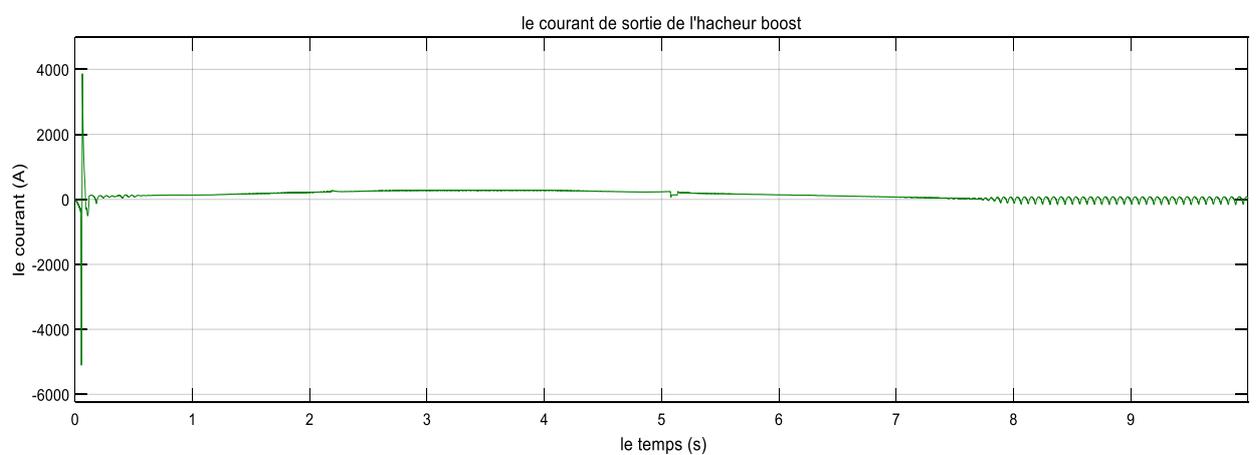


Figure. II. 6. Courants de sortie de l’hacheur boost.

III.3.3 Schéma de simulation de PV :

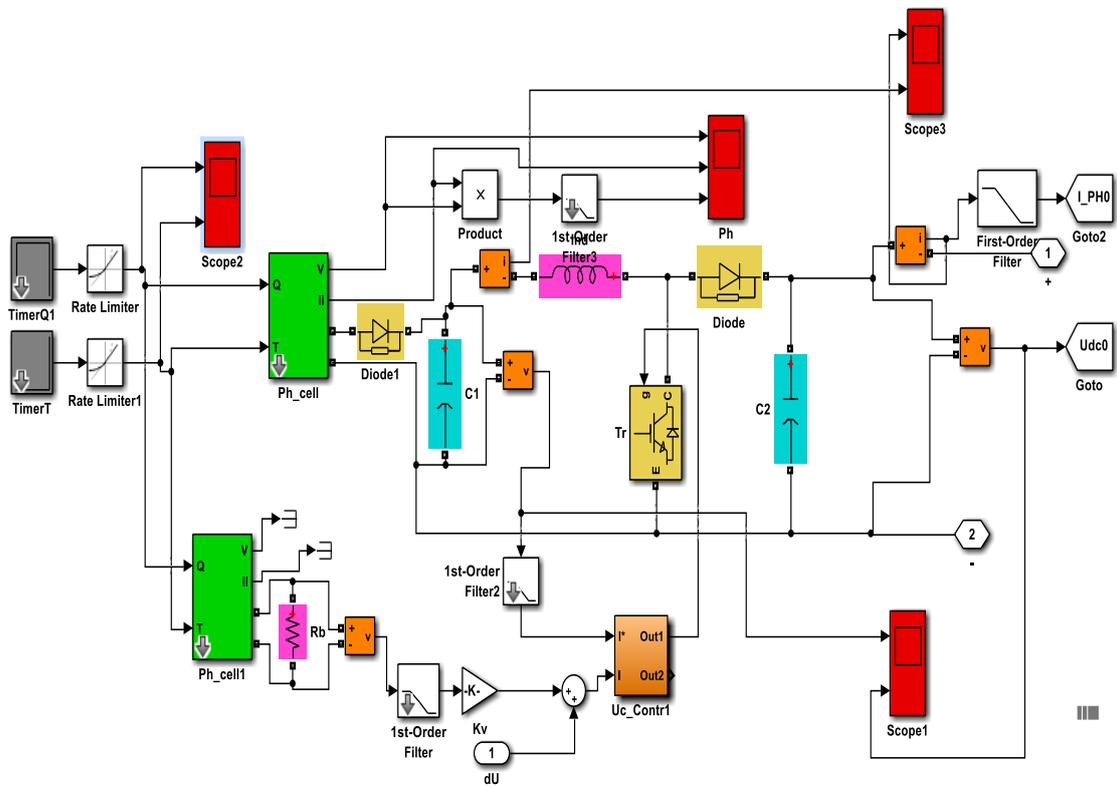


Figure III.7 :schéma de simulation de GPV :

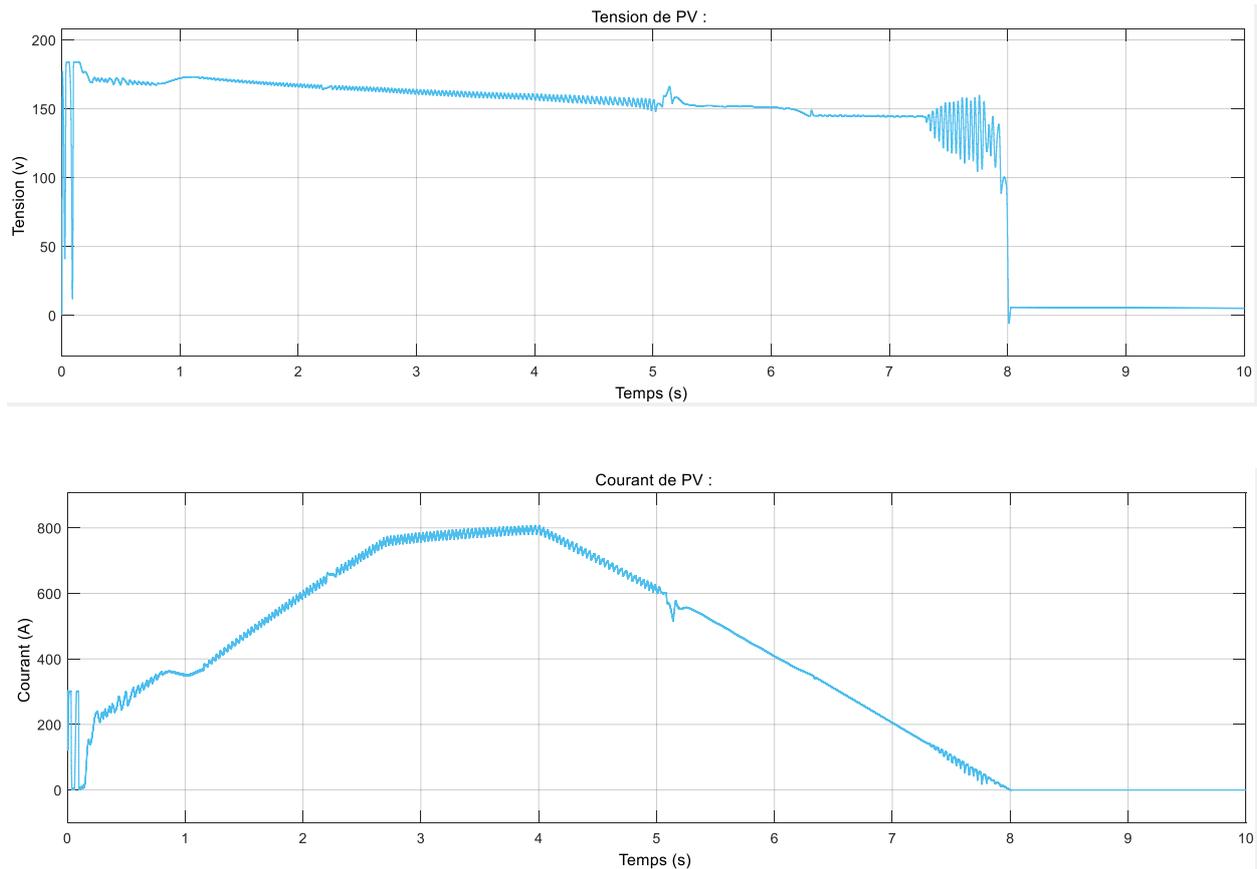


Figure III.8 : Résultats de simulation de GPV :

Commentaires :

- [0s : 0.1s] et [8s : 10s] : le GPV ne fonctionne pas à cause de l'absence d'éclairement.
- [0.1s : 8s] fonctionnement du GPV à cause de la présence d'éclairement et son travail est proportionnel avec l'éclairement.
- [2.7s : 4s] L'intervalle de fonctionnement maximal de GPV (l'éclairement maximal).

III.4 Contrôle de la pile à combustible

III.4.1 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 [62]. La PAC peut produire de l'énergie électrique sans interruption, tant qu'elle contient 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.9 montre les principaux composants du système à PAC considérés dans cette étude [68]. La pile PEMFC 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.

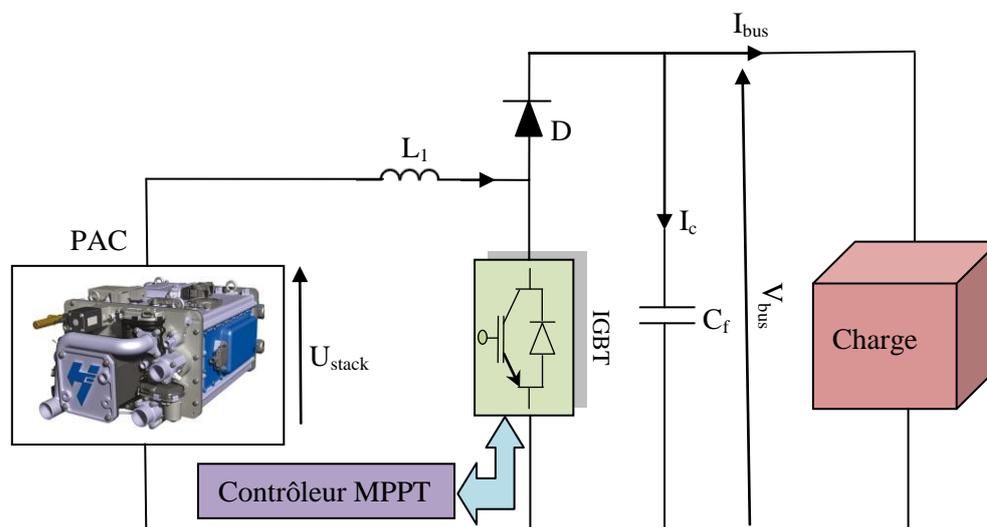


Figure III.9: Convertisseur survolteur (Boost) connecté à la pile à combustible [68]

D'après la figure III.9, 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 [68]. Dans le cas d'un hacheur survolteur l'inductance minimale de lissage L_l est donnée par la relation [III.1] [70] :

$$L_l = \frac{V_{bus}}{4\Delta I L_{max} f} \dots\dots\dots (III.1)$$

Où :

- ✚ V_{bus} : Tension du bus continu (V)
- ✚ f : fréquence de découpage du signal de commande de l'interrupteur (HZ)
- ✚ $\Delta I L$: 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.2] :

$$C_f = \frac{I_L}{4 \cdot \Delta V_{bus_max} \cdot f} \dots\dots\dots (III.2)$$

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.4.2. Modèle et circuit de commande de la PAC

La pile à combustible fournit une alimentation continue non réglée,

$$P_{fc} = i_{fc} u_{fc} \dots\dots\dots (III.3)$$

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

$$\frac{di_{fc}}{dt} = \frac{u_{fc} - u_{m_fc}^*}{L_{fc}} \dots\dots\dots (III.4)$$

u_{mfc} est la valeur moyenne de la tension modulée du hacheur. Le hacheur DC est décrit par des valeurs moyennes comme ci-dessous [67] :

$$\begin{cases} u_{mfc} = m_{fc} u_{fc} \\ i_{mfc} = m_{fc} i_{fc} \end{cases} \dots\dots\dots (III.5)$$

où: m_{fc} est le rapport cyclique du hacheur et i_{mfc} est la valeur moyenne du courant modulé du hacheur [70].

$$u_{m_fc}^* = \frac{v_{m_fc}^* v_{fc}}{\widehat{v}_{dc}} \dots\dots\dots(III.6)$$

u_{mfc_ref} est la référence de la tension modulée moyenne du hacheur. Il est fixé par le correcteur de courant (PI) (figure III.10) [70] pour maintenir le courant de la pile à combustible égal à la valeur souhaitée i_{fc_ref} :

$$u_{m_fc}^* = PI(i_{fc}^* - \widehat{i}_{fc}) + \widehat{v}_{dc} \dots\dots\dots(III.7)$$

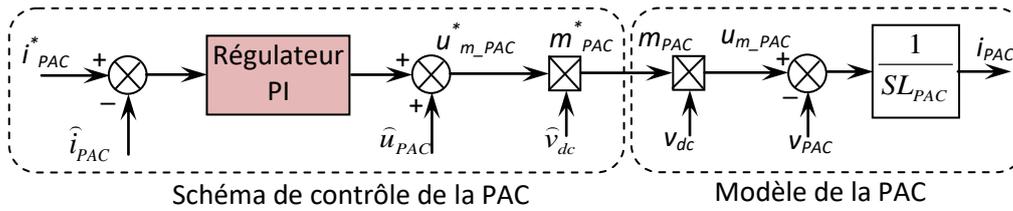


Figure III.10: Schéma fonctionnel de la modélisation et du contrôle du conditionnement de puissance

Lorsque la PAC conduit le courant, la chute de tension apparaît, elle peut donc être écrite comme $V = E - IR - \Delta V_{act} - \Delta V_{con} \dots\dots\dots(III.8)$

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 [68, 69].

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 [67],

$$\Delta V_{act} = A \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \dots\dots\dots(III.9)$$

où i est la densité de courant PAC (mA/cm^2), 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.8, au lieu de E, substituer $E_c = E + A \ln(i_0)$, alors

$$\Delta V_{act} = A \ln(i) \dots\dots\dots(III.10)$$

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

$$\Delta V_{con} = m e^{ni} \dots\dots\dots(III.11)$$

Où : m et n sont des constantes.

La tension de sortie du modèle est calculée par les équations III.8, III.9, III.10 et III.11. 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 de 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 [68, 69,72], les autres systèmes de stockage d'énergie connectés en parallèle au PAC sont utilisés, par exemple, les batteries ou (et) les ultra condensateurs.

III.4.3. Schéma et Résultats de simulation de la pile à combustible :

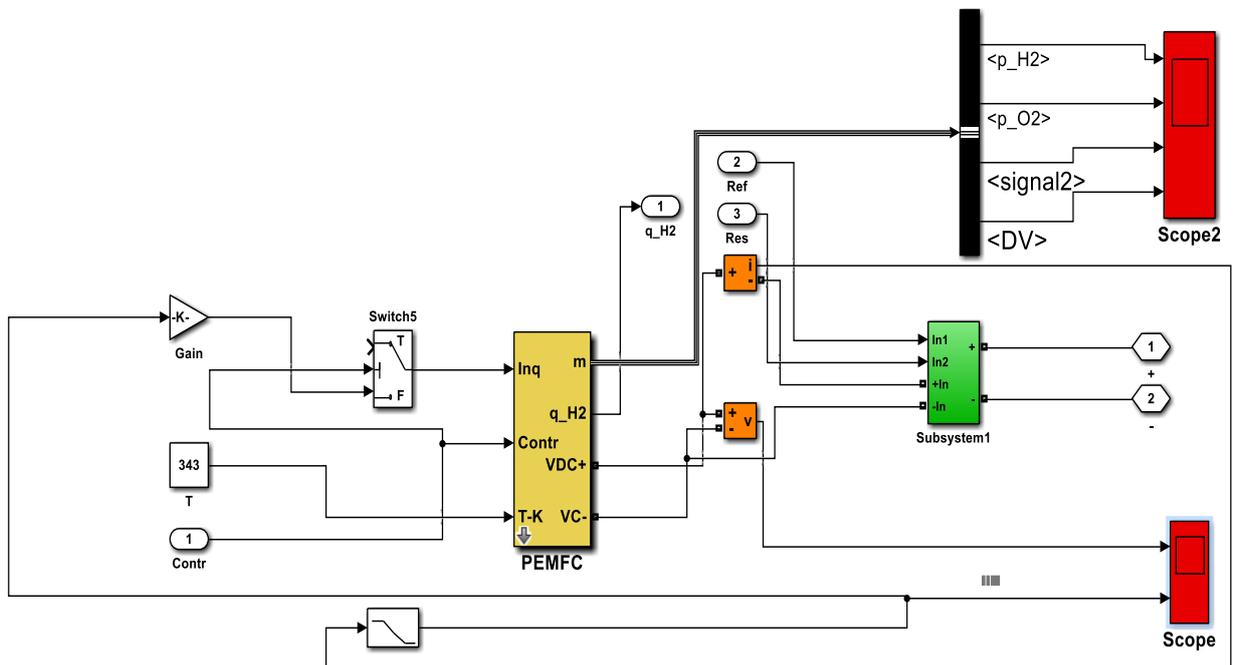


Figure III.11 :Schéma de simulation de la pile à combustible

III.4.4. Résultats de simulation de la pile à combustible :

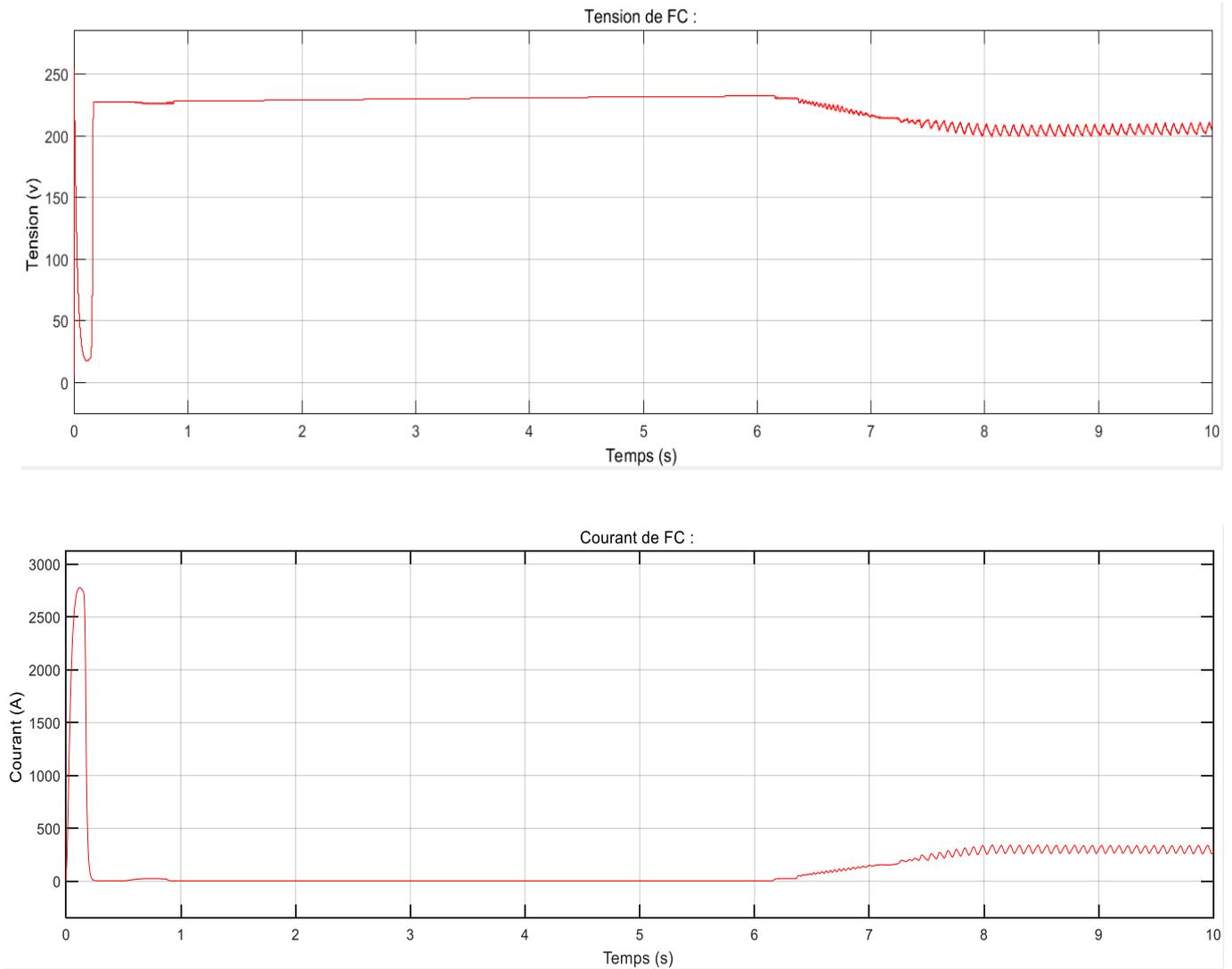


Figure III.12 : Allures de Tension et courant de FC

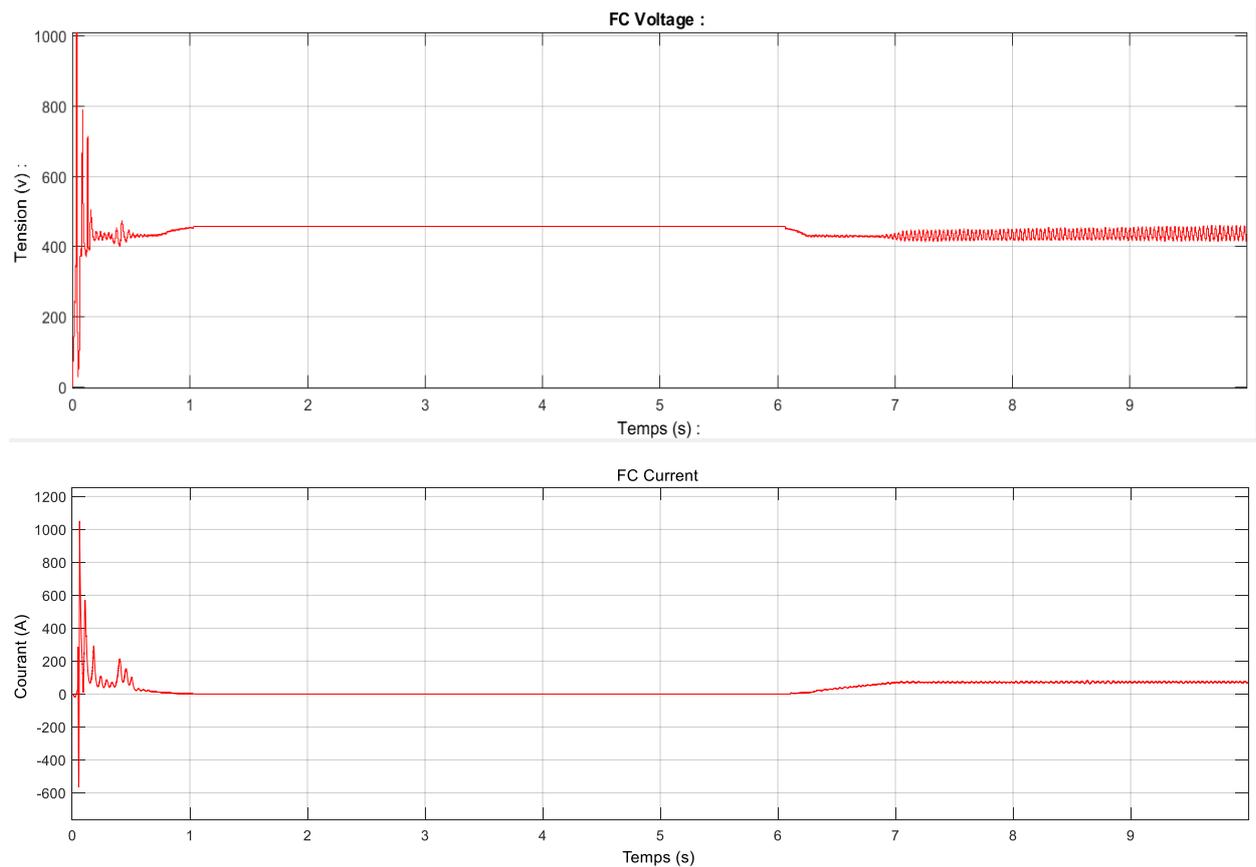


Figure III.13 : Allures de tension et courant de charge FC

Commentaires :

- [0s :0.4s] et [7s:10s] : la pile à combustible est fonctionne à cause de l'absence d'éclairement, (Le GPV ne fonctionne pas).
- [0.4s :7s] : la pile à combustible ne fonctionne pas parce que le GPV est fournit une puissance suffisante pour la charge.

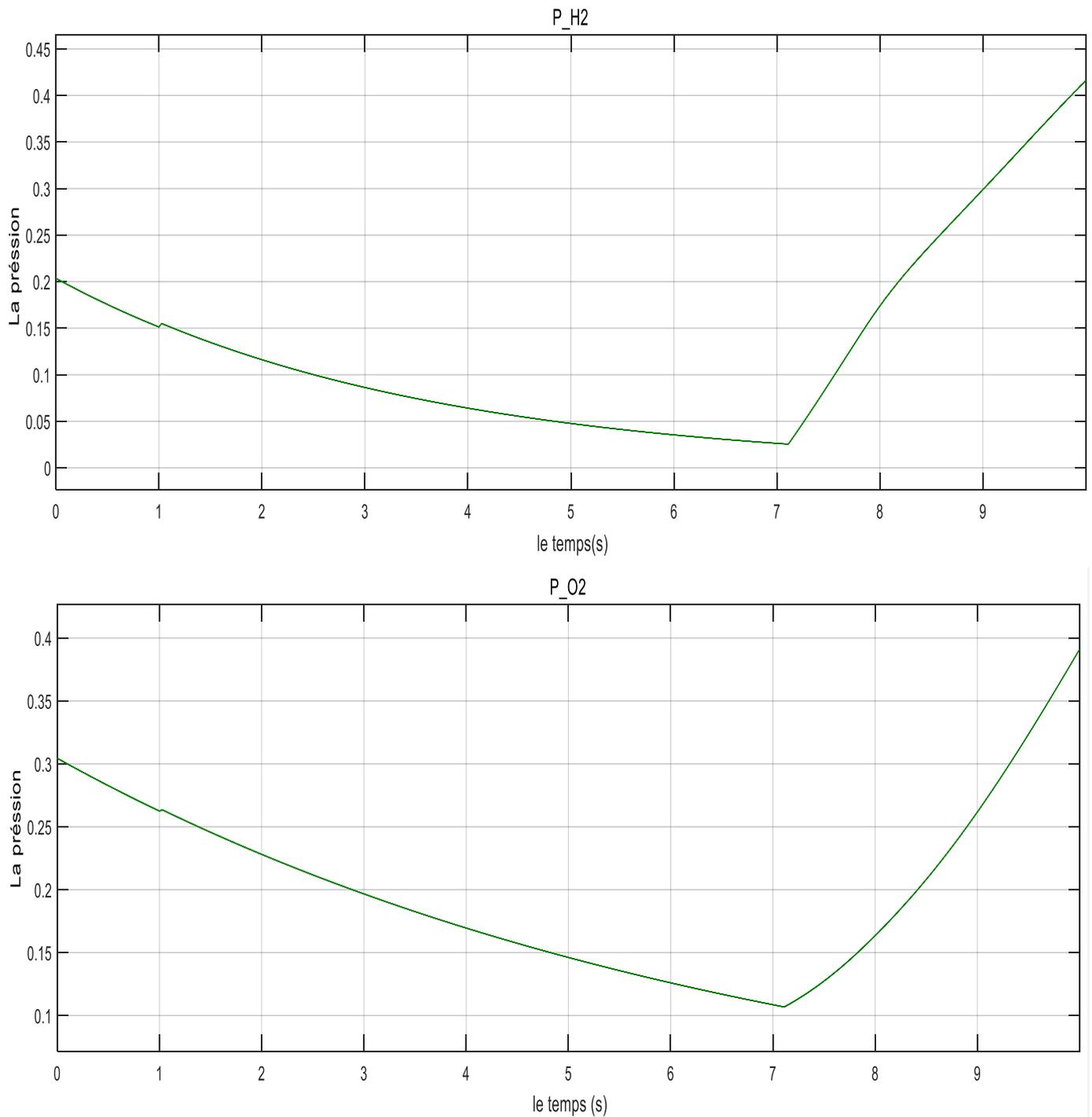


Figure III.14 : Resultat de simulation de FC

III.5. Contrôle de la batterie

III.5.1 système de commande

Un système de contrôle en cascade basé sur des contrôleurs PI peut être proposé pour la batterie (figure III.14), 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 [62, 64, 71]. 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} .

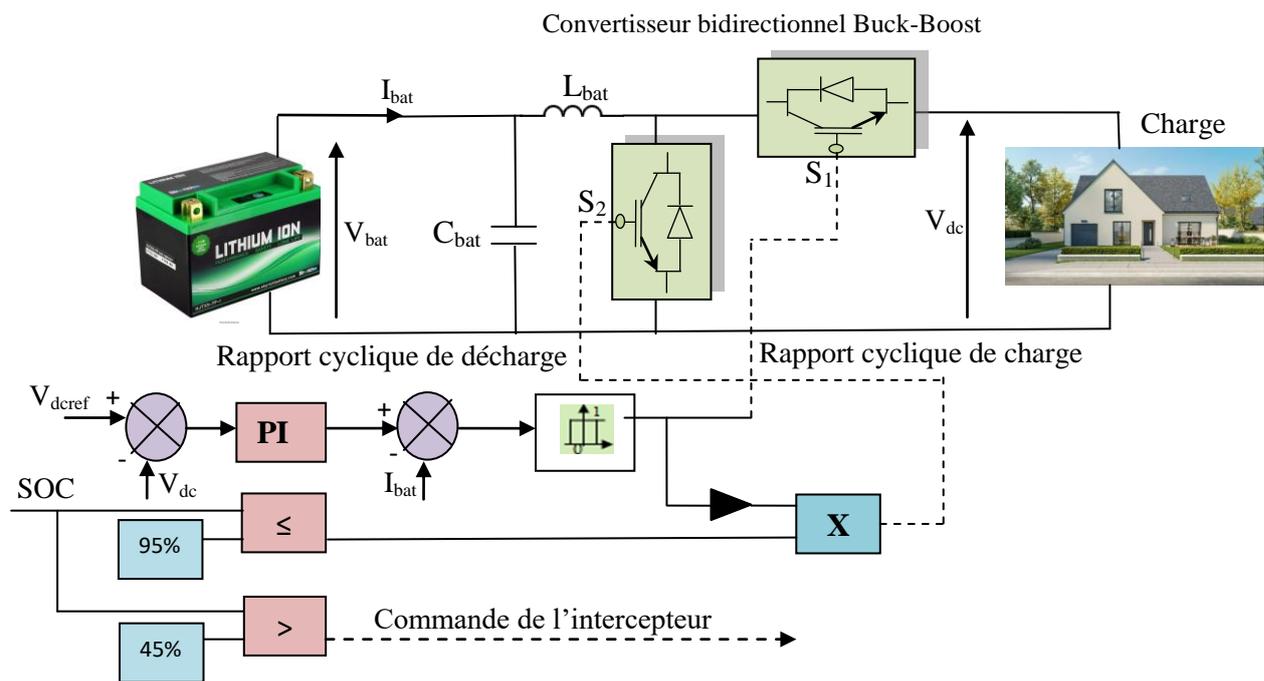


Figure III.15: Contrôle de la batterie [62]

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.15 [63, 71]. 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 $(SOC_{min} = 45\%) < SOC < (SOC_{max} = 95\%)$.

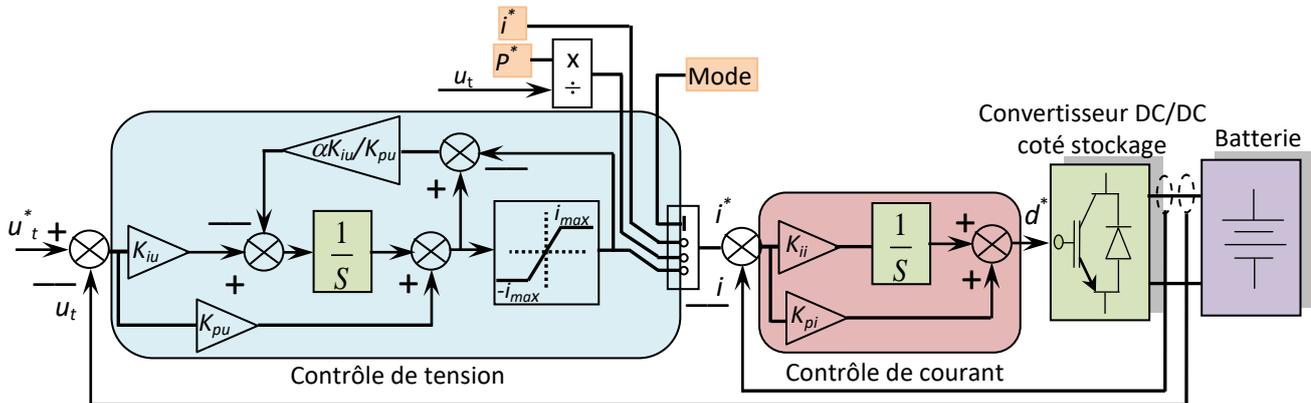


Figure III.16: Schéma de contrôle pour le convertisseur côté stockage rattaché à la batterie [63]

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 [67].

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 [66].

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 [70] :

$$i_{bat}^* = k_p (V_{dc}^* - V_{dc}) + k_i \int (V_{dc}^* - V_{dc}) dt \dots\dots\dots(III.12)$$

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:

$$d_{s3,s4} = k_p (i_{bat}^* - i_{bat}) + k_i \int (i_{bat}^* - i_{bat}) dt \dots\dots\dots(III.13)$$

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 [70].

III.5.2. Schéma et Résultats de simulation de Batterie :

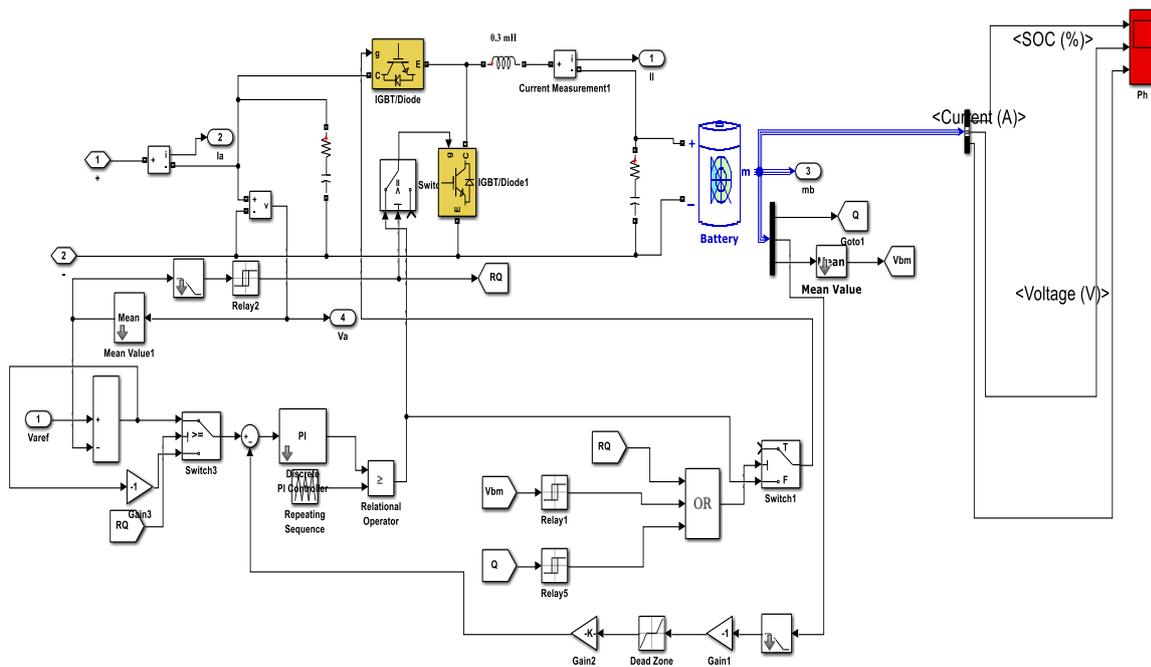


Figure III.17 : Schéma de simulation de la batterie

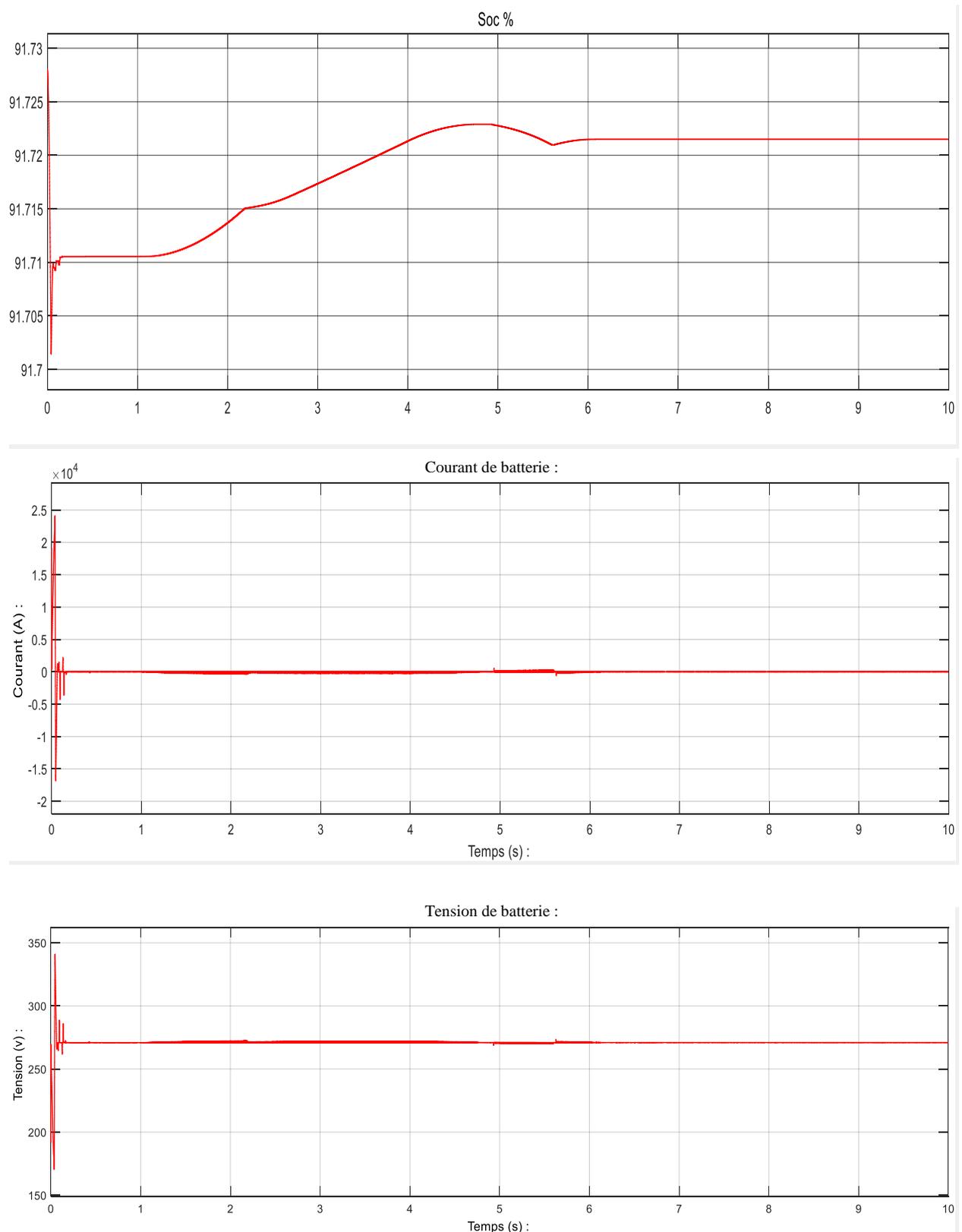


Figure III.18: Résultats de simulation de la batterie en cas de charge

Commentaires :

Dans l'état de charge, le niveau de stockage de la batterie(SOC) augmente pendant que le photovoltaïque fonctionne.

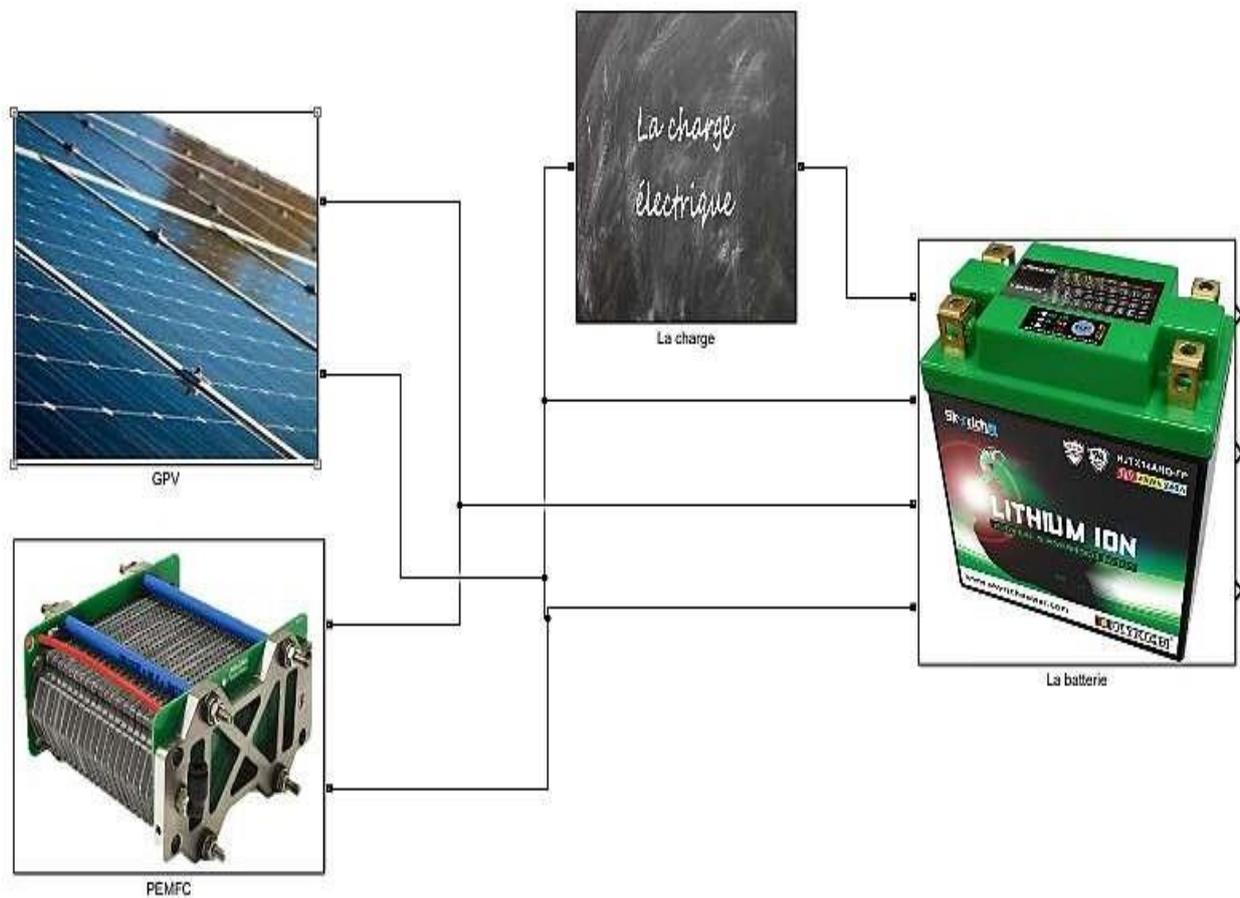
III.6. Gestion du système hybride**III.6.1. Schémas et Résultats de simulation**

Figure III.19 :Schéma globale de système hybride

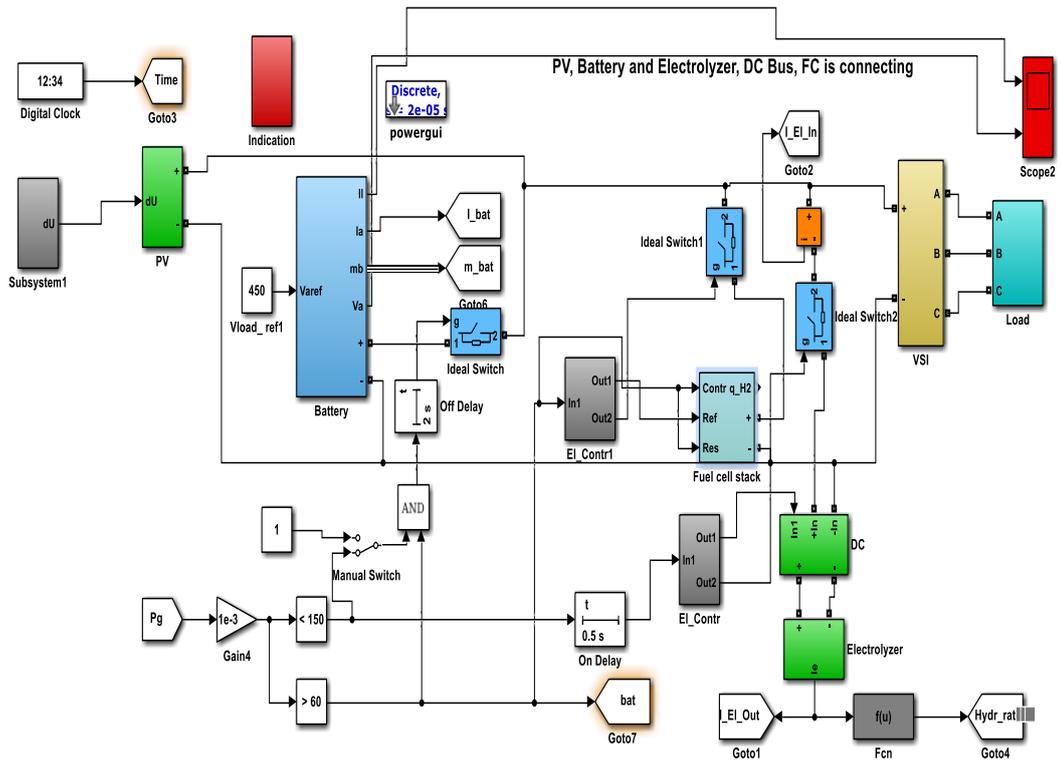


Figure III.20 : Schéma de simulation de système hybride

III.6.2. Résultats de simulation de système hybride

III.6.2.1. Résultat de charge

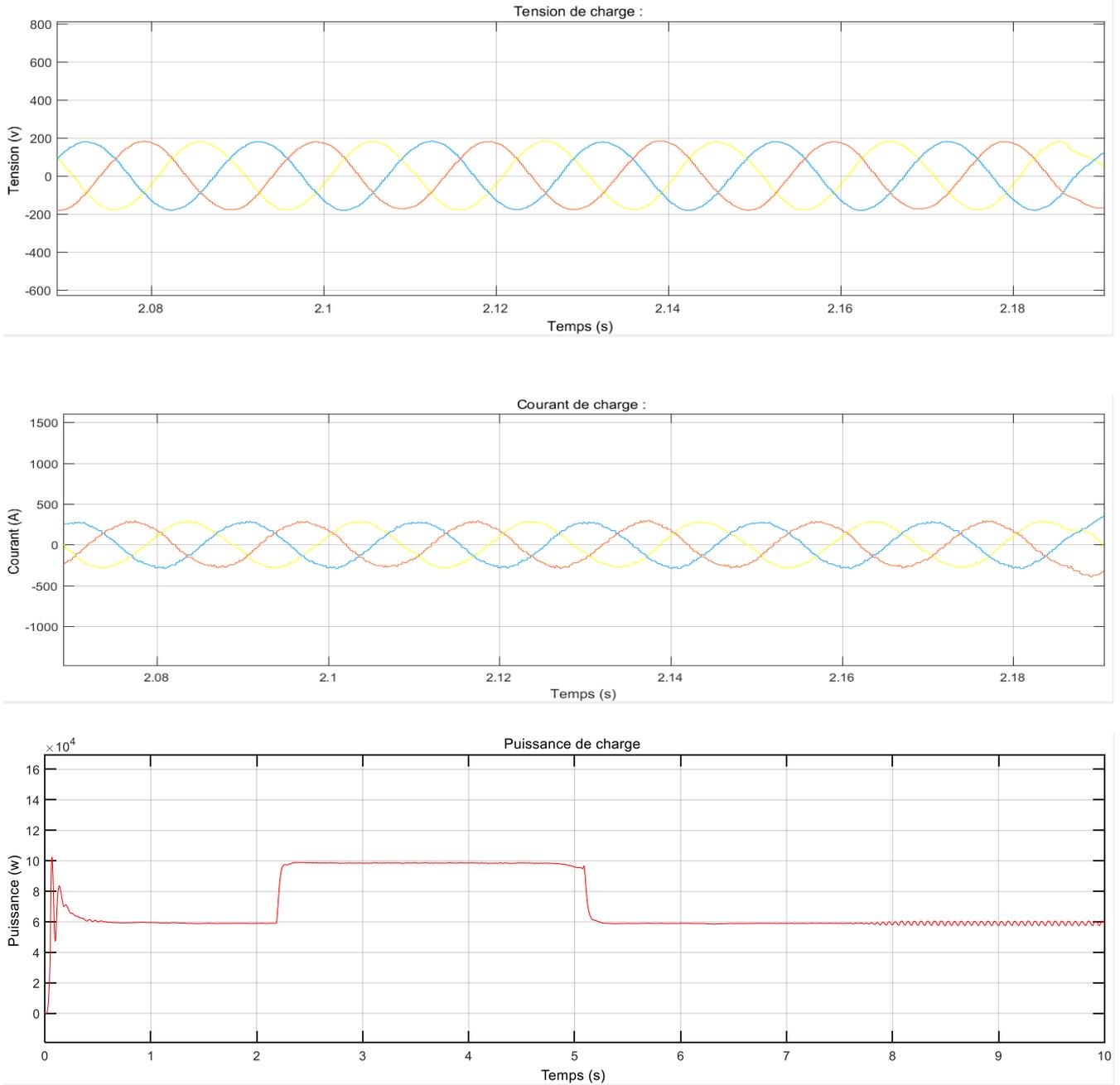


Figure III.21 : Résultats de simulation de la charge du système hybride

III.6.2.2. Résultats des sources

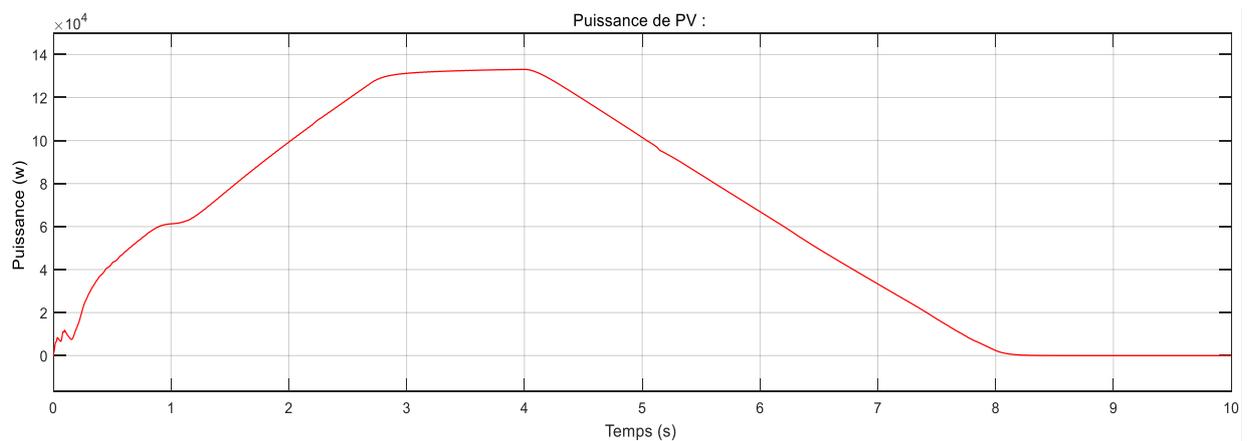


Figure III.22 : Résultats de simulation de GPV du système hybride

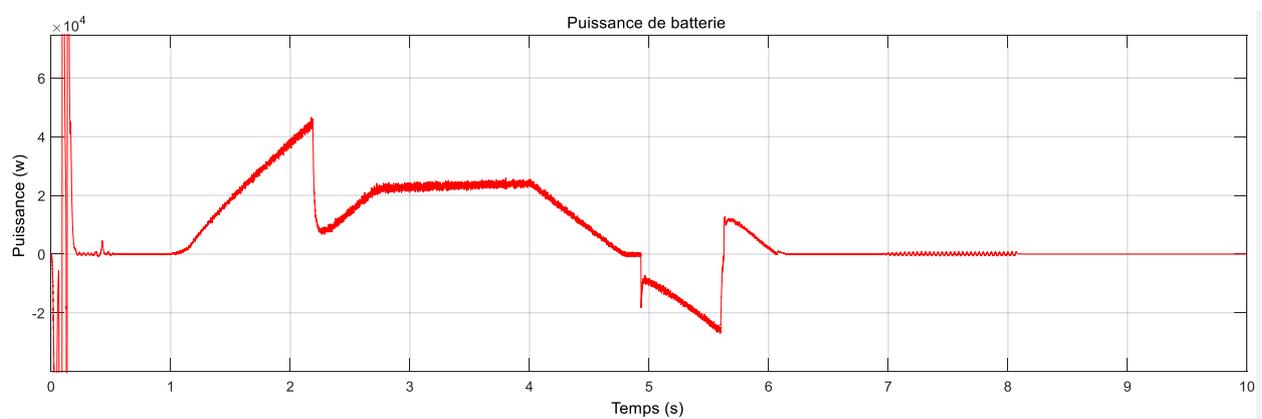


Figure III.23 : Résultats de simulation de batterie du système hybride

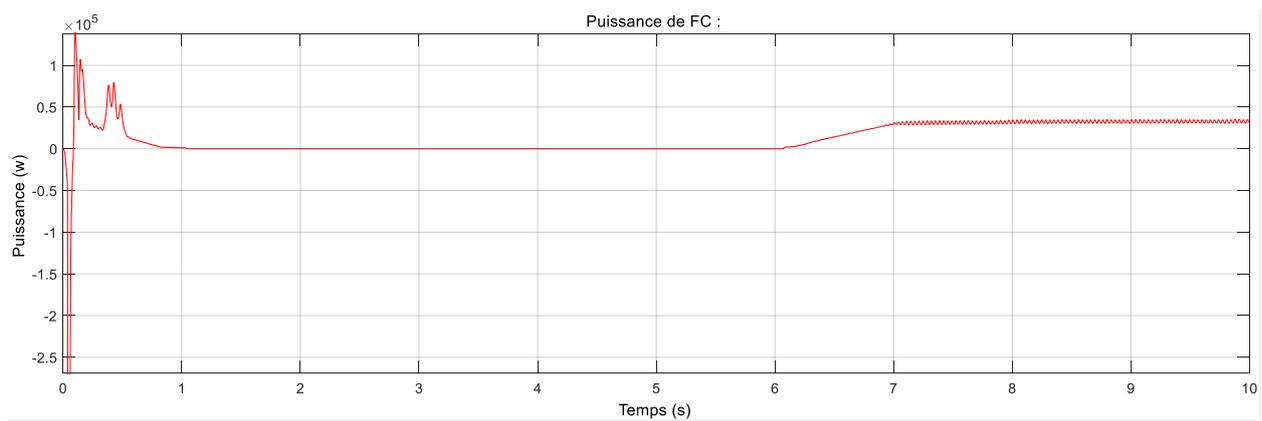


Figure III.24 : Résultats de simulation de la pile du système hybride

III.6.3. Gestions et Commentaires :

De l'intervalle de [0s :1s]

nous remarquons que la PAC et la batterie ont une puissance qui est transmise tant que la puissance Pv a commencé à augmenter en présence de lumière, avec la puissance de 70kw Pac, et de 5kw à 60kw en augmentation de puissance Pv, la charge est à 65 kw

De l'intervalle de [0s :2.8s]

nous remarquons que la puissance du Pac diminue jusqu'à ce qu'il cesse de produire de l'énergie, d'autre part le GPV fonctionne en présence de lumière et qu'il y a suffisamment d'énergie générée par celle-ci,

De l'intervalle de [2.8s :4s]

on constate un maximum de puissance produite par GPV , il suffit de la charger , la Pac et la batterie sont encore en veille ,

De l'intervalle de [4s :7s]

nous remarquons une diminution de la puissance du GPV causée par les lumières faibles, d'autre part, nous voyons que la Pac et la batterie ont commencé à générer de l'énergie pour la récupérer, car la puissance du GPV ne cesse de diminuer

De l'intervalle de [7s :10s]

nous remarquons que la puissance de pv ne génère pas, la puissance de Pac reste une valeur pour récupérer le manque de celle-ci,

Cas de charge :

✚ En la présence de GPV, le panneau fournit une puissance suffisante pour charger simultanément la batterie et alimenter la charge . on a obtenu les résultats suivantes :

- Courant de charge de GPV 150 (A).
- Tension de la charge de GPV 400 (V).
- Tension de la batterie 250 (V).

✚ Le GPV fournit une puissance de $P_{(pv)} \max = 130 \text{ kW}$.

✚ La puissance maximal de charge est : $P_{(ch)} \max = 100 \text{ kw}$.

Cas de décharge :

✚ En l'absence de GPV, la batterie est déchargée pour alimenter la charge à l'aide du PEMFC qui fournit une puissance suffisante pour compenser le déficit et maintenir les performances de la charge.

✚ La pile à combustible fournit une puissance de $P_{(pac)} \max = 45.3 \text{ kW}$.

- ✚ La batterie dans notre simulation représente une batterie réelle; qui besoin des heures pour la charge ou la décharge, c'est pour ça nous notons donc un léger changement de l'état de SOC ne peut pas être observé pendant le temps de simulation dans les deux cas.

III.6.4. Les interprétations des résultats

➤ Modes et Scénarios :

La source d'énergie renouvelable (photovoltaïque) est la source principale utilisée dans le système hybride proposé. Les batteries et l'électrolyseur sont rechargés chaque fois qu'il y a suffisamment d'énergies pour maintenir leur durée de vie, ils ne sont utilisés que si nécessaire en respectant l'état de charge des batteries entre le EDCmax et EDCmin et la pression d'hydrogène dans le réservoir. Ceci est réalisé grâce à une gestion rigoureuse selon les données météorologiques aléatoires et les variations de profile de charge, six modes sont possibles :

Mode 1 : $P_{pv} = P_{ch} \Rightarrow$ La charge est alimentée par PV,

Mode 2 : $P_{pv} > P_{ch} \Rightarrow$ La charge est alimentée par le PV,

$EDC < EDC_{max}$ chargement des batteries.

$P_{H2} < P_{H2max}$ chargement de réservoir d'hydrogène.

Mode 3 : $P_{pv} > P_{ch} \Rightarrow$ La charge est alimenté par le PV,

$EDC < EDC_{max}$ et $P_{H2} > P_{H2max}$

chargement de batterie.

Mode 4: $P_{pv} > P_{ch} \Rightarrow$ La charge est alimenté par le PV,

$EDC \geq EDC_{max}$ et $P_{H2} < P_{H2max}$

chargement de réservoir d'hydrogène.

Mode 5 : $P_{pv} < P_{ch} \Rightarrow$ la charge n'est pas satisfaite (compensation),

$$P_{ch} = P_{pv} + P_{pac} + P_{batt}$$

Mode 6 : $P_{pv} = 0, \Rightarrow$ la charge est alimentée par la pile à combustible et les batteries,

$$P_{ch} = P_{pac} + P_{batt}$$

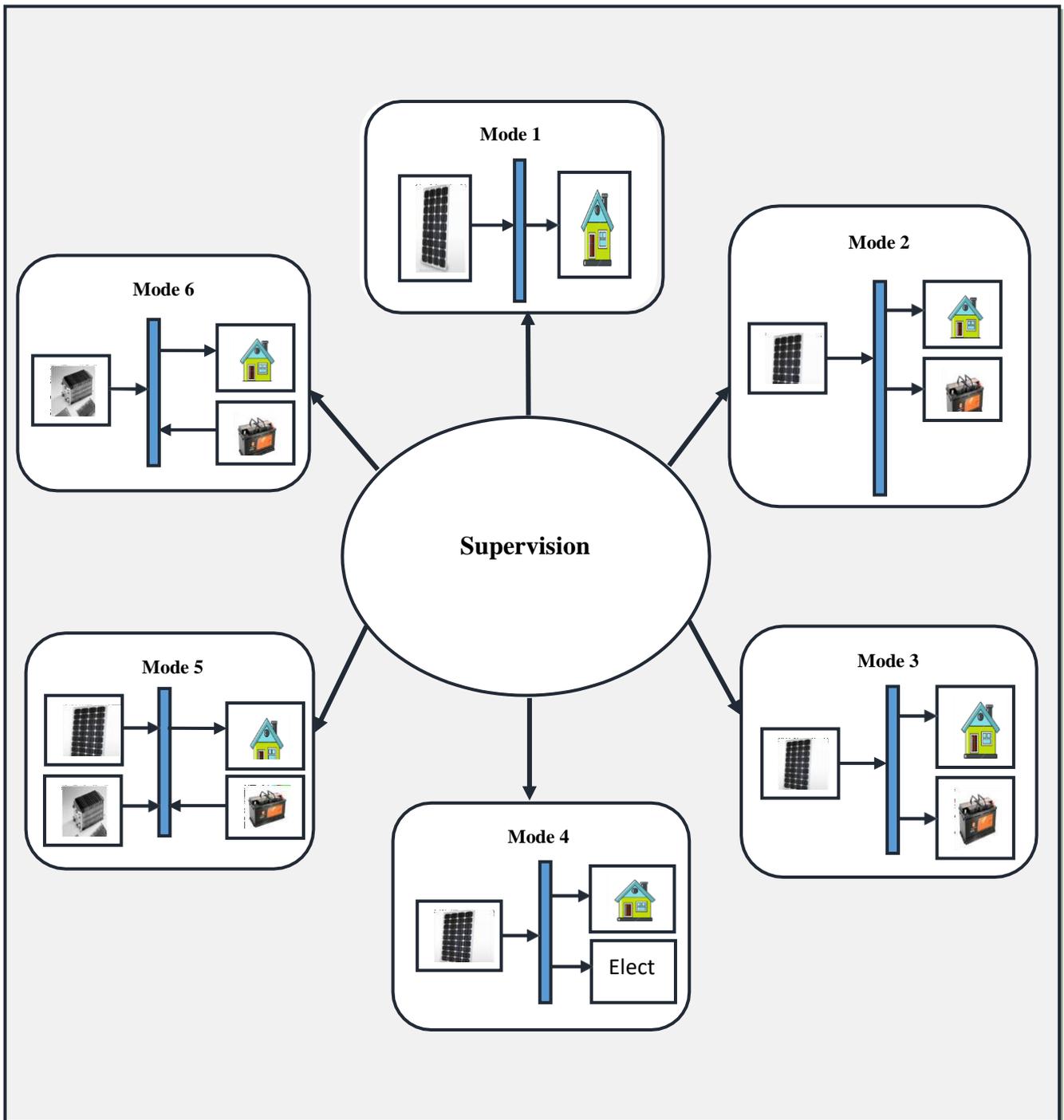


Figure III.25 Les différents modes fonctionnement

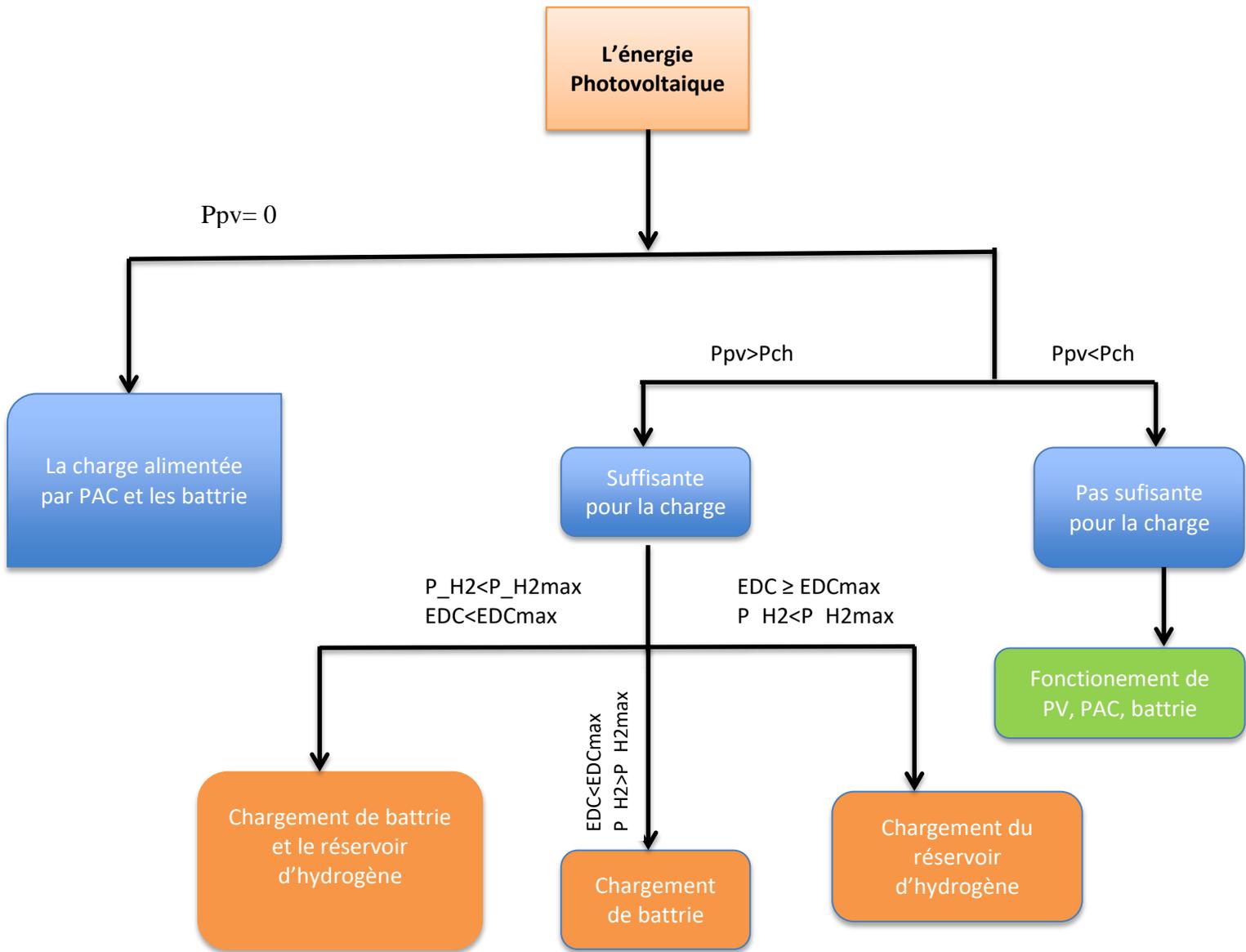


Figure.III.26 :organigramme des gestions de système hybride

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les modèles Simulink de chaque élément des chaînes de conversion photovoltaïque avec batteries et la pile à combustible. Nous avons conclu de la simulation qu'il est possible d'utiliser le système hybride on utilisant une commande pour gérer le système où chaque composant du système est utilisé selon les besoins. le dimensionnement de ce système a été effectué après l'estimation du potentiel énergétique et l'énergie demandée par l'utilisateur.

Une gestion d'énergie du système hybride étudié a développé, Les résultats de la simulation de tout le système hybride montrent l'efficacité de ce dispositif.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les systèmes d'énergie hybrides sont les plus prometteurs pour l'utilisation des énergies renouvelables. En Afrique où le potentiel énergétique solaire est élevé, il est important de favoriser la substitution systématique des sources d'énergie conventionnelles qui deviennent de plus en plus contraignantes au regard du coût d'exploitation et d'opération [4].

La ressource globale en énergie photovoltaïque est très importante et peut contribuer de manière significative à la fourniture d'électricité au niveau mondial.

Les travaux présentés concernent la production d'électricité à partir du système hybride. L'objectif était de maintenir un niveau de fiabilité élevé avec un coût minimal grâce à un dimensionnement optimal du système hybride pour une charge et une probabilité de perte d'énergie donnée sous le critère d'un prix minimum du système.

La production d'électricité par ce système hybride avec un système de stockage répond bien à la problématique posée par le contexte énergétique actuel. En Algérie, la nature du terrain et la durée de l'ensoleillement lui a permis d'être un des pays modèles dans la production des énergies renouvelables.

L'étude du système hybride et l'analyse des résultats montrent qu'il a un bon fonctionnement, qui suffit pour assurer l'énergie nécessaire à la charge. Cette énergie est disponible à toute heure de la journée, car les trois sources fonctionnent alternativement : une source peut compenser l'autre en cas d'absence. On peut utiliser le système hybride pour alimenter les sites isolés, et il peut également être utilisé dans les véhicules électriques.

Le premier chapitre de ce travail porte sur une étude générale sur les différentes composantes du système hybride composé de panneaux photovoltaïques, d'une pile à combustible et de batteries de stockage.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation sous Matlab Simulink du système hybride, qui est composé d'un générateur photovoltaïque, d'une pile à combustible, de régulateurs de la tension, d'une batterie de stockage. Ainsi que l'état de charge et décharge de la batterie. Cette modélisation aide à faciliter la simulation dans le dernier chapitre.

Dans le dernier chapitre, nous avons fait la simulation de notre système hybride, d'abord le système de panneaux photovoltaïques, ensuite le système de stockage (batterie) et le système de pile à combustible, finalement nous avons simulé le système global étudié.

Enfin, ce que nous avons conclu à partir de cette étude, il apparaît que le système hybride n'est pas sans inconvénients. Comme suggestion, on doit ajouter la gestion pour améliorer ses performances et réduire ses inconvénients.

l'Annexe

Annexes

Tableau. II.1. Paramètres d'un module photovoltaïque KC200GT.

<i>Paramètres</i>	<i>Unités</i>	<i>Valeurs</i>
P_{pv}	W	200.143
$V_{oc,n}$	V	32.9
$I_{sc,n}$	A	8.214
$I_{0,n}$	A	$9.825 \cdot 10^{-8}$
I_{mp}	A	7.61
V_{mp}	V	26.3
$I_{pv,n}$	A	8.21
R_p	Ω	415.405
R_s	Ω	0.221
K_V	V/K	-0.123
K_I	A/K	0.0032
G_n	W/m^2	1000
T_n	K	298.15
a	-	1.3
N_s	-	54
K	J/K	$1.381 \cdot 10^{-23}$
q	C	$1.602 \cdot 10^{-19}$

Tableau. III. 1. Paramètre du convertisseur Boost.

<i>Paramètres</i>	<i>Unités</i>	<i>Valeurs</i>
C_1	F	0.348
C_2	F	2
L	H	2.23

➤ **Les paramètres des sources**

panneaux	N_S	N_P	TN (k)	Current Nominal (A)	V_S (v)	P(kw)
1	4	1	298	8.03	170	0.24995
2	300	135	298	8.03	170	180.8

Tableau III.2 : Paramètres des panneaux photovoltaïque

Batterie	Type de la batterie	La tension nominale (V)	Capacit é(Ah)	Résistance interne (Ω)	Courant nominal de décharge (A)
	Lithium-ion	250	600	0.0041667	260.8696

Tableau III.3 : Paramètres de la Batterie

Pile à Combustible	Type de lapile	Zone active de la cellule(cm^2)	Le courant nominal (A)	Nombre de cells en series	La puissance nominale (kW)
	PEMFC	800	47	250	0.453

Tableau III.4 : Paramètres de la pile à combustible

➤ **Les paramètres de la charge :**

	La puissance (kw)	La tention de phase (v)	Fréquence(Hz)
Charge 1	60	220	50
Charge 2	40	220	50

Tableau III.5 : Paramètres la charge

Bibliographie

- [1] MEZZAI Sonia, TADJINE Katia « Étude D'un Système Hybride (Eolien – Photovoltaïque) » Mémoire de fin Cycle, Université Abderrahmane Mira-Bejaia, 2015.
- [2] S. khenfous, A. Kaabeche et S. Diaf « Optimisation du dimensionnement d'un système hybride photovoltaïque/éolien par des méthodes méta heuristiques », article (reçu le 10 juin 2017 - accepté le 30 juin 2017).
- [3] SEVAN Geitmann « Énergies renouvelables & carburants alternatifs », article, hydro-geitverlage, août 2017.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] R. RAJESH, M. C. MABEL, « A comprehensive review of photovoltaic systems », Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 51, November 2015, Pages 231-248.
- [7] 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, p. 1–30.
- [8] C. PASTOR, « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques », Thèse de doctorat, Institut National de Science Appliquée (INSA) de Toulouse, 2007
- [9] N. ABOUCHABANA, « Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT », Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009.
- [10] 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.
- [11] A.Bouharchoche, « Etude et Commande d'un Système de Production Hybride Eolien-photovoltaïque » , Thèse de Magister, Ecole Militaire Polytechnique,2013
- [12] W. Omran, "Performance Analysis of Grid-Connected Photovoltaic Systems", Thèse de doctorat, Université de Waterloo, Ontario, Canada, 2010.
- [13] S. Astie, "Conversion photovoltaïque : du rayonnement solaire à la cellule ", Techniques de l'Ingénieur, D 3 936..
- [14] A.Taher Azar, N.Ahmad Kamal, « Renewable Energy Systems - Modeling, Optimization and Control », Academic Press is an imprint of Elsevier,2021.
- [15] L. Stoyanov, "Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables", Doctorat en Energétique, Université Technique de Sofia, 2011.
- [16] D. Lu, « Conception et contrôle d'un générateur PV actif à stockage intégré Application à l'agrégation de producteurs-consommateurs dans le cadre d'un micro réseau intelligent urbain », Thèse de doctorat, ECL Lille, 2010.
- [17] # Sur la maitrise des investissements dans l'insertion des ressources renouvelables au réseau électrique#

- [18] Hristiyan KANCHEV « Gestion des flux énergétique dans un system hybride de source d'énergie renouvelable :optimisation de la planification opérationnelle et ajustement d'un micro-réseau électrique urbain » thèse doctorat école centrale de LILLE,2014
- [19] 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.
- [20] S.Bensmail ,« Optimisation et Gestion d'Énergie D'un Système Hybride A Energies Renouvelables »,Thèse de doctorat, Université de Bejaïa, 2017.
- [21] A.Mirecki. « Etude comparative de chaîne de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 2005.
- [22] L.Freris, D.Infield, « les énergies renouvelables pour la production d'électricité », Dunod, Paris, 2013.
- [23] S.Bensmail ,« Optimisation et Gestion d'Énergie D'un Système Hybride A Energies Renouvelables »,Thèse de doctorat, Université de Bejaïa, 2017.
- [24] A. El Khadimi, L. Bchir et A. Zeroual, « Dimensionnement et optimisation technico-économique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque - éolien avec système de stockage », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 7, pp : 73-83, (2004).
- [25] M.Kamran, M.Rayyan Fazal, « Renewable Energy Conversion Systems », Academic Press is an imprint of Elsevier, 2021.
- [26] 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 », mémoire pour l'obtention du diplôme de Master d'ingénierie, 2iE (Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement) , Burkina Faso, 2017
- [27] Z. Roumila «Commande d'un système d'énergie hybride (Photovoltaïque - éoliendiesel) », mémoire de magister de l'université A.MIRA Bejaia, Algérie, 2009.
- [28] Ahmad Taher Azar, Nashwa Ahmad Kamal, « Renewable Energy Systems Modeling, Optimization and Control », Academic Press- Elsevier, 2021.
- [29] L.Stoyanov, « Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables », Thèse de doctorat , Universite Technique De Sofia, 2011.
- [30] 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.
- [31] M.Rapin, J.Noël, « Energie Eolienne (Principes • Études de cas) », Dunod, Paris, 2010, ISBN 978-2-10-055060-9.
- [32] M.Koulali, K.Negadi, M.Mankour, A.Mezouar, A.Berkani, B.Boumediene, « Adaptive Fuzzy Control of Hybrid PV/Fuel Cell and Battery System using Three-Level T type Inverter », Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 95 NR 12/2019.
- [33] A.S.Belfedhal, « Modélisation et Commande d'un système de production d'électricité Photovoltaïque-Eolien », Thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique d'ELHARACH, 2019
- [34] M. Belatel, F. Benchikh, Z. Simohamed, F. Ferhat et F.Z. Aissous, "Technologie du couplage d'un système hybride de type photovoltaïque-éolien avec la pile à combustible pour la production de l'électricité verte", Revue des Energies Renouvelables Vol. 14 N°1,pp. 145 – 162, 2011
- [35] A.BorniI, « Etude Et Optimisation D'un Multi Système Hybride de Conversion D'énergie Electrique », Thèse de doctorat, Université Constantine 1, 2015

- [36] 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*, vol. 53, n° %3, pp. 305-315, 2020.
- [37] L. Stoyanov, G. Notton et V. Lazarov, « Optimisation des systèmes multi-sources de production d'électricité à énergies renouvelables », *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 10 N°1, 2007, PP.1-18.
- [38] D. Koussa, et M. Belhamel, "Production d'électricité sans interruption moyennant un système hybride (éolien – photovoltaïque – diesel)", *Revue des Energies Renouvelables ICRESD-07*, Tlemcen, 2007
- [39] T. Zhou, « Commande et Supervision Energétique d'un Générateur Hybride Actif Eolien Incluant du Stockage Sous Forme D'hydrogène et des Super-Condensateurs pour l'Intégration dans le Système Electrique d'un Micro Réseau », Thèse de Doctorat Ecole Centrale de Lille 2009.
- [40] 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.
- [41] A.Payman, « Contribution à la Gestion de l'Energie dans les Systèmes Hybrides Multi-Sources Multi-charges », Thèse de Doctorat, L'Institut National Polytechnique de Lorraine 2009.
- [42] Z.Laid « Etude Technique d'un Système d'Energie Hybride Photovoltaïque-Eolien Hors Réseau » Thèse de Doctorat, Université Mentouri de Constantine, 2010.
- [43] L.Croci, « Gestion De L'Energie dans un Système Multi-Sources Photovoltaïque et Eolien Avec Stockage Hybride Batteries/Supercondensateurs », Thèse de Doctorat, Université De Poitiers, 2013.
- [44] 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
- [45] D. Rekioua, S. Bensmail, N. Bettar « Development of hybrid photovoltaic fuel cell system for stand-alone application », *Int J Hydrogen Energy*, 39, pp1604-16 ; 2014.
- [46] H. Maker « Optimisation et gestion d'énergie pour un système hybride : association pile a combustible et supercondensateurs », thèse de doctorat de l'université de technologie Belfort Montbéliard, 2008
- [47] 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 de l'institut national polytechnique de Toulouse, 2004.
- [48] 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*, vol. 53, n° %3, pp. 305-315, 2020.
- [49] M.Kamran, M.Rayyan Fazal, « Renewable Energy Conversion Systems », Academic Press is an imprint of Elsevier, 2021.
- [50] Ahmad Taher Azar, Nashwa Ahmad Kamal, « Renewable Energy Systems Modeling, Optimization and Control », Academic Press- Elsevier, 2021
- [51] M.Dahmane, « Gestion, Optimisation et Conversion des Énergies pour Habitat Autonome », Thèse de doctorat, Université de Picardie Jules Verne, 2020.
- [52] B.Madaci, « Architectures intégrées de gestion de l'énergie pour les multi-systèmes autonomes utilisant le stockage par accumulateurs », Thèse de doctorat, Université des Frères Mentouri Constantine, 2018.
- [53] S.SAIB, « Contribution à l'optimisation d'un système hybride (PV/éolien) avec stockage d'énergie connecté au réseau électrique », Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas - Setif1, 2018

- [54] S.Bensmail ,« Optimisation et Gestion d'Énergie D'un Système Hybride A Énergies Renouvelables »,Thèse de doctorat, Université de Bejaïa, 2017.
- [55] A.Meharrar, « Modélisation, Optimisation et Contrôle des Systèmes Hybrides : Éolienne/Pile à combustible », Thèse de doctorat, Université des Sciences et de technologie d'Oran, 2012.
- [56] M.Hatti, « Contribution à l'Étude des Systèmes Hybrides Photovoltaïque / Pile à Combustible », Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran "Mohamed Boudiaf", 2010
- [57] A. Berrada, R. El Mrabet, « Hybrid Energy System Models », Elsevier, 2021.
- [58] A.Lièvre, « Développement d'un système de gestion de batterie lithium-ion à destination de véhicules "mild hybrid", Détermination des indicateurs d'état (SoC, SoH et SoF) », Thèse de doctorat, Université Claude Bernard Lyon 1, 2015.
- [59] B.Bessedik, « Intitulé: Contribution à l'étude des systèmes hybrides: PV/Pile à Combustible/Supercondensateur », Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran "Mohamed Boudiaf", 2020.
- [60] ARARIA Rabah. Contribution à la Modélisation et la Commande d'un Véhicule Electrique Hybride à Architecture Série/Parallèle (Étude Théorique et Expérimentale). PhD thesis, Université de Tiaret, 2020
- [61] F.Díaz-Gonzalez, A.Sumper, O.Gomis-Bellmunt, « Energy Storage In Power Systems », John Wiley & Sons Ltd, 2016.
- [62] M.Kamran, M.Rayyan Fazal, « Renewable Energy Conversion Systems », Academic Press is an imprint of Elsevier, 2021.
- [63] Ahmad Taher Azar, Nashwa Ahmad Kamal, « Renewable Energy Systems Modeling, Optimization and Control », Academic Press- Elsevier, 2021
- [64] M.Dahmane, « Gestion, Optimisation et Conversion des Énergies pour Habitat Autonome », Thèse de doctorat, Université de Picardie Jules Verne, 2020.
- [65] B.Madaci, « Architectures intégrées de gestion de l'énergie pour les multi-systèmes autonomes utilisant le stockage par accumulateurs », Thèse de doctorat, Université des Frères Mentouri Constantine, 2018.
- [66] S.SAIB, « Contribution à l'optimisation d'un système hybride (PV/éolien) avec stockage d'énergie connecté au réseau électrique », Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas - Setif1, 2018
- [67] S.Bensmail ,« Optimisation et Gestion d'Énergie D'un Système Hybride A Énergies Renouvelables »,Thèse de doctorat, Université de Bejaïa, 2017.
- [68] A.Meharrar, « Modélisation, Optimisation et Contrôle des Systèmes Hybrides : Éolienne/Pile à combustible », Thèse de doctorat, Université des Sciences et de technologie d'Oran, 2012.
- [69] M.Hatti, « Contribution à l'Étude des Systèmes Hybrides Photovoltaïque / Pile à Combustible », Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran "Mohamed Boudiaf", 2010
- [70] A. Berrada, R. El Mrabet, « Hybrid Energy System Models », Elsevier, 2021.
- [71] A.Lièvre, « Développement d'un système de gestion de batterie lithium-ion à destination de véhicules "mild hybrid", Détermination des indicateurs d'état (SoC, SoH et SoF) », Thèse de doctorat, Université Claude Bernard Lyon 1, 2015.
- [72] B.Bessedik, « Intitulé: Contribution à l'étude des systèmes hybrides: PV/Pile à Combustible/Supercondensateur », Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran "Mohamed Boudiaf", 2020.

الملخص:

تتطور الطاقات المتجددة (الهيدروليكية، والشمسية، وطاقات الرياح، والطاقات الحرارية الأرضية، والكتلة الحيوية) بشكل مكثف في جميع أنحاء العالم، مدفوعة بالحاجة إلى مكافحة الاحتباس الحراري عن طريق الحد من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري. ومن عيوب هذه الطاقة أن مصادرها قد لا تكون متوفرة في ظروف معينة، لذلك تم اعتبار استخدام النظام الهجين كأفضل حل لهذه المشكلة. في هذا العمل، درسنا نظاماً هجيناً يتكون من مولد كهربائي ضوئي (لوحة شمسية) وخلية وقود وبطارية. هذا النظام يشحن حمولة كهربائية. استخدمنا إدارة كل مكون من مكونات النظام من أجل استخدام كل مكون حسب الحاجة. أجريت الدراسة تحت Simulink / Matlab باستخدام المحولات.

الكلمات المفتاحية: مولد ضوئي، خلية وقود، نظام هجين، بطارية

Résumé :

Les énergies renouvelables (hydraulique, solaire, éolien, géothermie et biomasse) se développent intensément partout dans le monde, portées par la nécessité de lutter contre le réchauffement climatique en réduisant les émissions de gaz à effet de serre. Et l'un des inconvénients de cette énergie est que ses sources peuvent ne pas être disponibles dans certaines circonstances, il a donc été envisagé d'utiliser le système hybride comme la meilleure solution à ce problème.

Dans ce travail, nous avons étudié un système hybride constitué d'un générateur photovoltaïque (panneau solaire), d'une pile à combustible et d'une batterie. Ce système alimente une charge électrique. Nous avons utilisé le management de chaque composant du système afin d'utiliser chacun selon le besoin. L'étude a été réalisée sous Matlab / Simulink avec l'utilisation des convertisseurs.

Mots clés : Générateur photovoltaïque, Pile à combustible, Système hybride, Batterie.

Abstract:

Renewable energies (hydraulic, solar, wind, geothermal and biomass) are developing intensely all over the world, driven by the need to fight against global warming by reducing greenhouse gas emissions. And one of the disadvantages of this energy is that its sources may not be available in certain circumstances, so it was considered to use the hybrid system as the best solution to this problem.

In this work, we studied a hybrid system consisting of a photovoltaic generator (solar panel), a fuel cell and a battery. This system powers an electrical load. We used the management of each component of the system in order to use each as needed. The study was carried out under Matlab / Simulink with the use of converters.

Keywords: Photovoltaic generator, Fuel cell, Hybrid system, Battery.
