



Université Abderrahmane Mira-Bejaïa
Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

Mémoire de fin d'études

En vue l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique

Option : Energies renouvelables en électrotechnique

Thème

***Gestion de puissance d'un système hybride
avec stockage***

Réalisé par :

Mr.IDIR Syphax

Mr . HAMANI Khaled

Encadré par :

Mr. N. MEBARKI

Promotion 2024/2025

Populaire et Démocratique Algérienne République
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Déclaration sur l'honneur

Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans l'élaboration d'un travail de recherche

Arrêté ministériel n° 1082 du 27 décembre 2020 () fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat*

Je soussigné,

Nom : HAMANI

Prénom : Khaled

Matricule : 202033002293

Spécialité et/ou Option : énergies renouvelables en électrotechnique

Département : Génie électrique

Faculté : sciences et technologies

Année universitaire : 2024 /2025

et chargé de préparer un mémoire de (*Licence, Master, Autres à préciser*) : Master

Intitulé : Gestion de puissance d'un système hybride avec stockage

déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques, et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le
16/09/2025

HAMANI Khaled

(*) *Lu et approuvé*



Populaire et Démocratique Algérienne République
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa

Déclaration sur l'honneur

**Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans
l'élaboration d'un travail de recherche**

Arrêté ministériel n° 1082 du 27 décembre 2020 () fixant les règles relatives à la
prévention et la lutte contre le plagiat*

Je soussigné,

Nom : IDIR

Prénom : Syfaxe

Matricule : 191933006438

Spécialité et/ou Option : énergies renouvelables en électrotechnique

Département : Génie électrique

Faculté : sciences et technologies

Année universitaire : 2024 /2025

et chargé de préparer un mémoire de (*Licence, Master, Autres à préciser*) : Master

Intitulé : Gestion de puissance d'un système hybride avec stockage

déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques, et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le
16/09/2025

IDIR Syfaxe

(*) Lui et approuvé

Le Président de l'Assemblée
Populaire Communale
et par délégation
l'Officier d'état civil
MEZZAI Radia

President du conseil municipal
et par délégation
l'Officier d'état civil
MEZZAI Radia

Remerciements

Remerciements

Avant tout, nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience pour réaliser.

Nous dédions ce modeste travail :

A nos très chers parents, que Dieu les garde et les protège pour leur soutien moral et financier, pour leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont enduré. A notre encadrant Mr. MEBARKI pour son accompagnement durant tout ce projet

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

On tiens à remercier Mm .REKIOUA

Pour son engagement et sa disponibilité et pour la qualité de son enseignements .

grâce à elle on a approfondir nos connaissances sur les énergies renouvelables et développer un réel intérêt pour ce domaine.

Dédicace

POUR CHAQUE DÉBUT IL Y A UNE FIN, ET CE QUI EST BEAU
DANS TOUTE FIN C'EST LA RÉUSSITE ET L'ATTEINTE
DES OBJECTIFS.

JE DÉDIE CE MÉMOIRE À MES CHERS PARENTS QUI
ÉTAIENT TOUJOURS À MES CÔTÉS ET M'ONT TOUJOURS
SOUTENU TOUT AU LONG DE CES LONGUES ANNÉES
D'ÉTUDES. EN SIGNE DE RECONNAISSANCE, QU'ILS
TROUVENT ICI, L'EXPRESSION DE MA PROFONDE
GRATITUDE POUR TOUT CE QU'ILS ONT CONSENTE
D'EFFORTS ET DE MOYENS POUR ME VOIR RÉUSSIR DANS
MES ÉTUDES.

A MON PETIT FRÈRE ET MA CHÈRE SŒUR ET MA FUTURE
FEMME (s) QUI ONT
ÉTÉS LA POUR ME SOUTENIR DANS CHAQUE ÉTAPE. A
MES AMIS ET MA FAMILLE.

À MON BINÔME HAMANI KHALED AINSI QU'À TOUTE SA
FAMILLE.

IDIR SYPHAX

dédicace

Avant tout, je remercie Dieu tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Je dédie ce mémoire à mes parents, pour leur amour, leur soutien indéfectible et leurs sacrifices constants.

À ma famille, pour leur encouragement et leur inspiration.

À mes frère et mes sœurs, pour leur soutien et leur complicité qui m'ont aidé à surmonter chaque étape de ce parcours.

À mon binôme IDIR Syphax, ainsi qu'à toute sa famille.

À mes amis(es), pour leur soutien et leur inspiration tout au long de ce parcours.

HAMANI Khaled

Sommaire

Table des matières

Introduction générale1

Chapitre I :Généralités sur les systèmes hybrides

I.1	Introduction :.....	2
I.2	Définition des systèmes hybrides :.....	2
I.3	Importance de l'utilisation des systèmes hybrides :	3
I.4	Les différentes configurations des systèmes hybrides:.....	4
I.4.1.	L'architecture à bus courant continu (CC) : où les différentes sources d'énergie sont reliées à un bus commun en courant continu :	4
I.4.2.	L'architecture à bus courant alternatif (CA) : où toutes les sources alimentent directement un réseau alternatif.....	5
I.4.3.	L'architecture mixte à bus CC-CA :.....	5
I.5.	différentes combinaisons des Systèmes Hybrides à Énergies Renouvelables :.....	6
I .6.	Avantages et inconvénients d'un système hybride:	8
I .6.1.	Avantages:.....	8
I .6.2.	Inconvénients:	8
I .7.	Conclusion:.....	8

Chapitre II : Modélisation du système étudié

II.1	Introduction :.....	9
II.2.	Modélisation d'un générateur photovoltaïque :.....	9
II .2.1.	Modèle a une diode :.....	9
II .2.2.	Modèle à deux diodes :	10
II .2.3.	Caractéristique courant tension et schéma équivalente :	11
II .2.4.	L'influence de l'éclairement sur un panneau photovoltaïque :	13
II .2.4.1.	L'influence de l'éclairement sur le fonctionnement d'un panneau photovoltaïque :	13
II.2.4.2.	L'influence de la température sur le fonctionnement d'un panneau photovoltaïque :	13
II.3	Commande du système photovoltaïque au point de puissance maximale :	14
II.4.	Les convertisseurs DC-DC (hacheurs) :.....	16
II.5.	pile à combustible :	17
II .5.1.	Historique :	17

II .5.2.Principe de fonctionnement :	18
II .5.3.Modèle de la pile à combustible type PEM :	19
II .5.4.Caractéristique électrique de la pile à combustible :	23
II .5.5.Avantages et inconvénients de la PAC :	23
II.6 Système de Batterie :	24
II .6.1.Modélisation de la batterie :	24
II .6.2.Hacheur parallèle réversible en courant :	26
II .7. Conclusion :	27

Chapitre III : Gestion de puissance du système étudié

III.1 Introduction :	31
III .2. Gestion d'énergie :	31
III.2 Stratégies de gestion adaptées au système étudié :	32
III.2 .1 Stratégie à base de règles :	32
III.2 .2. Stratégie hiérarchique par priorité :	32
III .2.3.Stratégie à base d'optimisation déterministe :	32
III .2.4.Stratégie à base d'optimisation stochastique (apprentissage automatique) :	30
III 2.4.1.Les règles floues :	30
III .2.4.2.Les règles à base des réseaux neurones :	31
III.2.5 Machine Learning :	31
III.3.Organigramme de gestion de puissance :	31
III.4.Différents scénarios pour la gestion d'énergie :	32
III.5. Conclusion	33

Chapitre IV : Résultats de simulation

IV.1. Introduction :	34
IV.2. Générateur photovoltaïque:	35
IV.3. batterie :	39
IV .4.Pile à combustible :	41
IV .5.Conclusion :	44

Conclusion Générale :45**Références bibliographique**

Liste des Figures et des tableaux

Liste des figures

Chapitre I :Généralités sur les systèmes hybrides

Figure .I.1: Système hybride à énergies renouvelables	2
Figure .I. 2: Schéma d'une architecture a bus cc.....	4
Figure .I. 3: schéma d'une architecture CA	5
Figure .I. 4: Schéma d'une architecture a bus mixte CC /CA	5
Figure .I. 5: Hybride Solaire-Éolien:	6
Figure .I. 6: système hydride solaire-hydraulique(step).....	7
Figure .I. 7 : schéma d'un système hybride PV-Batterie-PAC.....	7
Figure .I. 8: Schéma d'un système hybride éolien – PV – DIEZEL	8

Chapitre II :Modélisation du système étudié

Figure .II. 1: schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode[11].....	9
Figure .II. 2: schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à deux diodes.....	10
Figure .II. 3: Les différentes zones de fonctionnement d'un module photovoltaïque	11
Figure .II. 4 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V) et P(V) à T=25°C	13
Figure .II. 5: Courbe I(V) et P(V) pour différentes Température[16]	14
Figure .II. 6: Caractéristique Ppv(Vpv) et fonctionnement de la méthode Perturbation et Observation	14
Figure .II. 7 : Organigramme de la méthode perturbation et observation.....	15
Figure .II. 8: Schéma de principe d'un convertisseur Boost	16
Figure .II. 9: Schémas équivalents du hacheur survolté, (a) : K fermé, (b) : ouvert.....	16
Figure .II. 10: Schéma de principe d'une cellule de pile de type PEMFC.....	19
Figure .II. 11: Modèle R-C de la batterie.....	25
Figure .II. 12: Hacheur parallèle réversible en courant.....	26

Chapitre III :Gestion de puissance du système étudié

Figure .III 1: Schéma du système global étudié.	31
Figure .III 2 : Fonctions et degrés d'appartenance de la logique floue.....	30
Figure .III 3: Organigramme de la stratégie de gestion de l'énergie	32

Chapitre IV :Résultats de simulation

Figure . IV. 1: Schéma du système global.....	34
Figure . IV. 2: Allure de l'éclairement.....	35
Figure . IV. 3: Variation du le courant de GPV	36
Figure . IV. 4: Variation du la tension de GPV	36
Figure . IV. 5: Variation de la puissance de GPV	37
Figure . IV. 6: Convertisseur (Boost) de GPV	38
Figure . IV. 7: Variation de tension de GPV à la sortie du convertisseur (Boost).	38
Figure . IV. 8: Système de batterie sous Matlab Simulink.....	39
Figure . IV. 9: Variation du le courant de la batterie.....	39
Figure . IV. 10: Variation du courant de la batterie	40
Figure . IV. 11: Soc de la batterie	40
Figure . IV. 12: Variation de puissance de la batterie	41

Figure . IV. 13: Variation de puissance de la pile a combustible.....	42
Figure . IV. 14: Variation de la puissance demandée.....	42
Figure . IV. 15: Variation de la puissance globale du système	43
Figure . IV. 16: Variation de la tension Vdc du système	43
Figure . IV. 17: tension Vdc avec boost	44

Liste des tableaux

Chapitre IV :Résultats de simulation

Tableau IV. 1: Caractéristiques électriques du module photovoltaïque.....	35
Tableau IV. 2: Les valeurs de IGPV, VGPV et PGPV	37
Tableau IV. 3: Paramètres de la batterie	39
Tableau IV. 4: Paramètres de la pile à combustible.....	41

Listes des grandeurs physiques avec leurs unités

Photovoltaïque:

I : Courant fourni par la cellule [A]

V : Tension à la borne de la cellule [V]

I_{ph} : Photocourant [A], proportionnel à l'irradiance Φ , avec correction selon T

I_s : Courant de saturation de la diode [A], dépendant de la température [A]

R_s : Résistance série [W].

R_{sh} : Résistance shunt (ou parallèle) [W].

q : Charge de l'électron = 1,602. 10-19 Coulomb

K : Constante de Boltzmann = 1,38. 10-23 J/K

A : Facteur de qualité de la diode, normalement compris entre 1 et 2.

T : Température effective de la cellule [Kelvin].

Φ et $\Phi_{réf}$: Irradiance effective et de référence [W/m²].

T et $T_{réf}$: Température effective et de référence [K].

μ_{Isc} : Coefficient de température du photocourant (ou courant de court-circuit), il est souvent donné par le fabricant, il est en général positif mais très faible.

Eg : Energie de Gap de la cellule (Silicium cristallin Eg = 1,12eV, CdTe = 1,5 eV...)

Pile à combustible :

Vact : polarisation active

Vohm : polarisation ohmique

Vconc : polarisation de concentration

T : température opératoire de la pile (K) .

P^*_{H2} : pression partielle à l'interface de l'hydrogène (atm).

P^*_{O2} : pression partielle à l'interface de l'oxygène(atm).

I_{pac} : courant de fonctionnement de la pile (A)

C^*_{O2} :représente les concentrations d'oxygène(mol / cm^3)

P_{cath} : la pression de l'oxygène à la cathode

x_{H2O}^{sat} : la fraction molaire de saturation de l'eau dans le gaz humidifié et supposé \approx à 50 %

P_{anod} : est la pression de l'oxygène à l'anode.

R_c : est la résistance équivalente de contact à la conduction des électrons

R_M : est la résistance équivalente de la membrane à la conduction des protons

l :est l'épaisseur de la membrane (μm),

r_M : est la résistance spécifique

A : est la surface active de la pile (cm^3)

B : est une constante empirique qui dépend du type de pile et de son état de fonctionnement,

J :est la densité de courant du fonctionnement permanente (A/ cm^2) ,

J_{max} :est la densité de courant maximale

Batterie :

E_0 : Source idéale de tension

V_{batt} : La tension aux bornes de la batterie [V].

$V_{C_{bat}}$: La tension aux bornes du condensateur de la batterie [V].

I_{bat} : Le courant traversant la batterie [A].

R_s : La résistance série de la batterie [Ω].

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

Soc_{batt} : l'état de charge de la batterie [%]

Q_{batt} : capacité de la batterie en [Ah ou Wh]

Introduction générale

Introduction générale :

Imaginez une maison isolée, perchée au sommet d'une colline, loin de tout réseau électrique. Le ciel y offre chaque jour son lot de lumière, mais parfois aussi ses caprices. La nuit tombe, les nuages s'installent, et pourtant, à l'intérieur, les lumières restent allumées, l'eau reste chaude, et les appareils fonctionnent sans interruption. Aucun générateur bruyant. Aucun câble relié à une centrale. Seulement un système intelligent, autonome, silencieux. Ce scénario, longtemps considéré comme une utopie technologique, devient aujourd'hui une réalité grâce à la convergence de plusieurs avancées : les énergies renouvelables, les systèmes de stockage et les architectures hybrides[1].

Dans ce monde en transition énergétique, la dépendance aux énergies fossiles se transforme progressivement en une exigence d'indépendance énergétique, propre, flexible et résiliente. Cependant, derrière cette quête d'autonomie se cache un défi de taille : comment orchestrer en temps réel des sources d'énergie aux comportements si différents, entre le chaos de l'irradiation solaire, la lenteur électrochimique de la pile à hydrogène, et la réactivité électrique de la batterie ? Ce défi n'est plus seulement technologique : il est algorithmique, énergétique, et stratégique[2].

Ce projet de fin d'études explore précisément cet enjeu : concevoir une intelligence de gestion de puissance capable de piloter un système hybride composé de panneaux photovoltaïques, d'une pile à hydrogène (PEMFC) et d'un système de stockage par batteries. Cette approche ne vise pas simplement à produire de l'énergie, mais à la rendre continue, intelligente, et adaptée à la demande.

Le cœur de ce travail repose sur la modélisation dynamique et la simulation sous MATLAB/Simulink d'une architecture complète, avec tous ses composants physiques et logiques. Le but n'est pas seulement de représenter un système, mais de lui donner un comportement optimal, capable de décider quand produire, quand stocker, quand relayer l'effort à la batterie ou à la pile, tout en maintenant la stabilité du bus DC.

Dans un monde énergétique en recomposition, cette étude n'est pas une simple simulation c'est un laboratoire virtuel d'un futur énergétique, où chaque watt compte, chaque transition est pensée, et où l'autonomie énergétique devient une question d'intelligence embarquée.

Chapitre I
Généralités sur les systèmes
hybrides

I.1 Introduction :

Le problème avec la puissance variable et non garantie produite par les sources d'énergie renouvelables, peut être résolu par un couplage des sources d'approvisionnement et la formation d'un système dit hybride (SH). Un système hybride à sources d'énergie renouvelables (SHSER) est un système électrique, comprenant plus d'une source d'énergie, parmi lesquelles une au moins est renouvelable. Le système hybride peut comprendre un dispositif de stockage. D'un point de vue plus global, le système énergétique d'un pays donné peut être considéré comme un système hybride.

I.2 Définition des systèmes hybrides :

Les systèmes hybrides désignent des installations qui associent plusieurs types de sources ou de technologies énergétiques dans le but d'améliorer à la fois l'efficacité de la production et la continuité de l'alimentation en énergie. En matière d'énergies renouvelables, ces systèmes combinent généralement diverses ressources telles que l'énergie solaire, éolienne, hydraulique ou encore la biomasse. Ils peuvent également être associés à des dispositifs de stockage comme les batteries, les supercondensateurs ou encore les réservoirs d'hydrogène, voire à des générateurs classiques pour renforcer leur autonomie et stabilité énergétique [3].



Figure .I.1: Système hybride à énergies renouvelables

I.3 Importance de l'utilisation des systèmes hybrides :

Les systèmes hybrides utilisant plusieurs sources d'énergies renouvelables constituent une réponse essentielle aux enjeux actuels de transition énergétique. Ils permettent non seulement de renforcer la stabilité de l'approvisionnement en électricité, mais aussi d'optimiser l'utilisation des ressources locales tout en limitant les impacts environnementaux liés à la production d'énergie[4].

1. Optimisation de la production énergétique :

- L'association de différentes sources d'énergie permet d'exploiter au mieux les ressources naturelles disponibles.
- Par exemple, le solaire photovoltaïque fonctionne efficacement pendant la journée, tandis que l'éolien peut produire de l'électricité même la nuit ou par temps nuageux, assurant ainsi une alimentation continue.

2. Amélioration de la fiabilité et de la continuité d'alimentation :

- En combinant plusieurs sources d'énergie, un système hybride réduit les risques de coupure d'électricité dus à la variabilité des énergies renouvelables.
- Un stockage énergétique (batteries, supercondensateurs) ou un générateur d'appoint (diesel, pile à combustible) peut être intégré pour pallier les périodes de faible production.

3. Réduction des coûts énergétiques à long terme :

- Bien que l'investissement initial puisse être plus élevé, les coûts d'exploitation et de maintenance sont réduits par rapport aux systèmes conventionnels utilisant des combustibles fossiles.
- La diminution de la dépendance aux carburants fossiles entraîne une stabilité financière en évitant les fluctuations des prix du pétrole et du gaz.

4. Impact environnemental réduit :

- En favorisant l'usage d'énergies propres, les systèmes hybrides contribuent à la réduction des émissions de gaz à effet de serre.
- La diversification énergétique permet de limiter l'exploitation intensive des ressources naturelles et d'améliorer l'empreinte écologique des installations.

5. Applications adaptées aux zones isolées et aux micro-réseaux :

- Les systèmes hybrides sont une solution idéale pour les régions éloignées ou non raccordées au réseau électrique national.

I.4 Les différentes configurations des systèmes hybrides:

Notre planète regorge de sources d'énergie renouvelable telles que le solaire, l'éolien, l'hydraulique, la biomasse et la géothermie. Ces sources peuvent être transformées en électricité ou en chaleur selon les besoins. Certaines d'entre elles, comme la géothermie, la biomasse et l'énergie solaire, offrent également la possibilité de cogénération, produisant simultanément électricité et chaleur.

Depuis le début des années 1990, les énergies renouvelables ont connu une croissance remarquable à l'échelle mondiale. Au sein de l'Union européenne, la capacité installée de l'énergie éolienne a affiché une hausse moyenne annuelle de 34 %, tandis que le solaire a progressé d'environ 30 %. Cette évolution s'explique notamment par la diminution des ressources fossiles, les perspectives économiques prometteuses des énergies vertes, et l'adoption de politiques environnementales favorisant une transition vers des sources d'énergie durables et plus propres[4].

L'intégration des énergies renouvelables repose sur des équipements d'électronique de puissance et des systèmes de stockage adaptés. Trois principales architectures sont utilisées pour les systèmes hybrides de stockage d'énergie :

I.4.1. L'architecture à bus courant continu (CC) : où les différentes sources d'énergie sont reliées à un bus commun en courant continu :

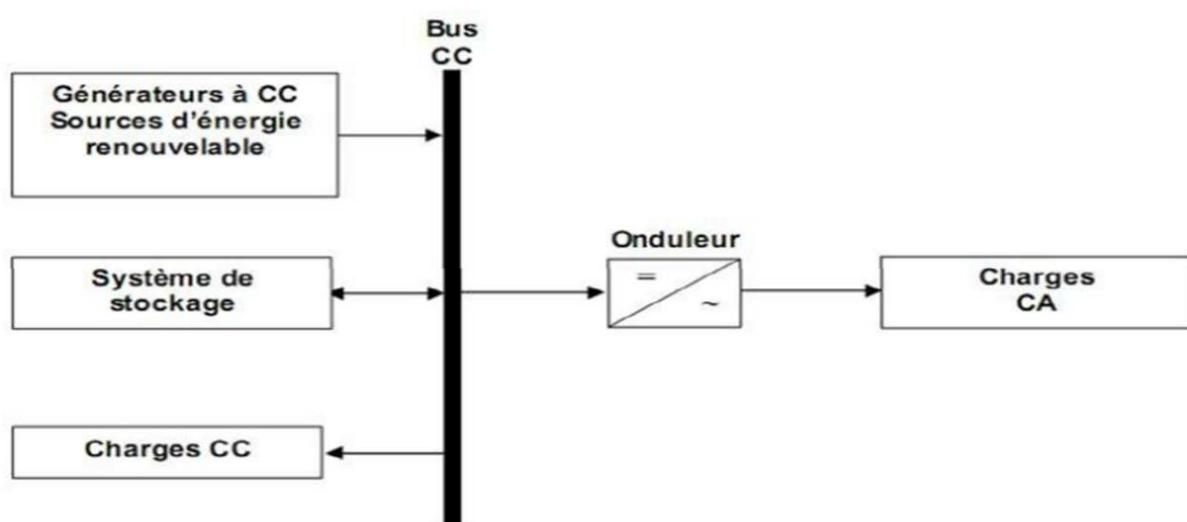


Figure I. 2: Schéma d'une architecture a bus cc

I .4.2.L'architecture à bus courant alternatif (CA) : où toutes les sources alimentent directement un réseau alternatif.

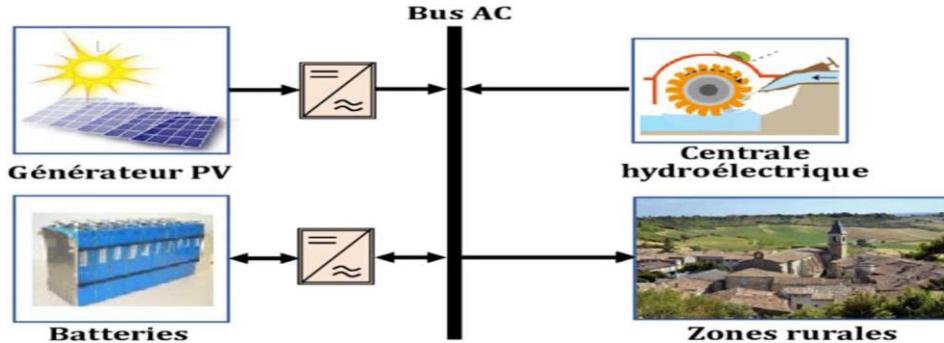


Figure .I. 3: schéma d'une architecture CA

I .4.3.L'architecture mixte à bus CC-CA :

Combinant les avantages des deux précédentes pour une meilleure flexibilité et gestion de l'énergie.

Ces configurations permettent d'optimiser la production et l'utilisation des énergies renouvelables, garantissant ainsi une alimentation énergétique plus stable et efficace.

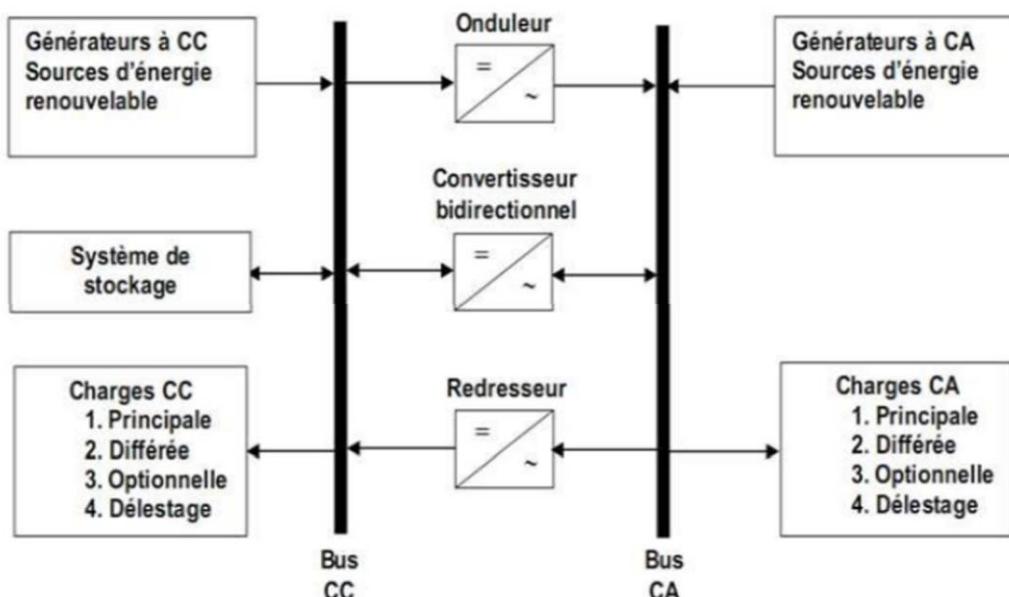


Figure .I. 4: Schéma d'une architecture à bus mixte CC/CA

I.5. différentes combinaisons des Systèmes Hybrides à Énergies Renouvelables :

Les systèmes hybrides à énergies renouvelables combinent plusieurs sources d'énergie pour optimiser la production et assurer une alimentation électrique stable. Voici les principales combinaisons possibles :

I.5.1. Hybride Solaire-Éolien:

Ce système combine des panneaux photovoltaïques et des éoliennes pour produire de l'électricité à partir de deux sources complémentaires. Il est idéal pour des régions présentant à la fois un bon ensoleillement et un potentiel éolien suffisant[5].

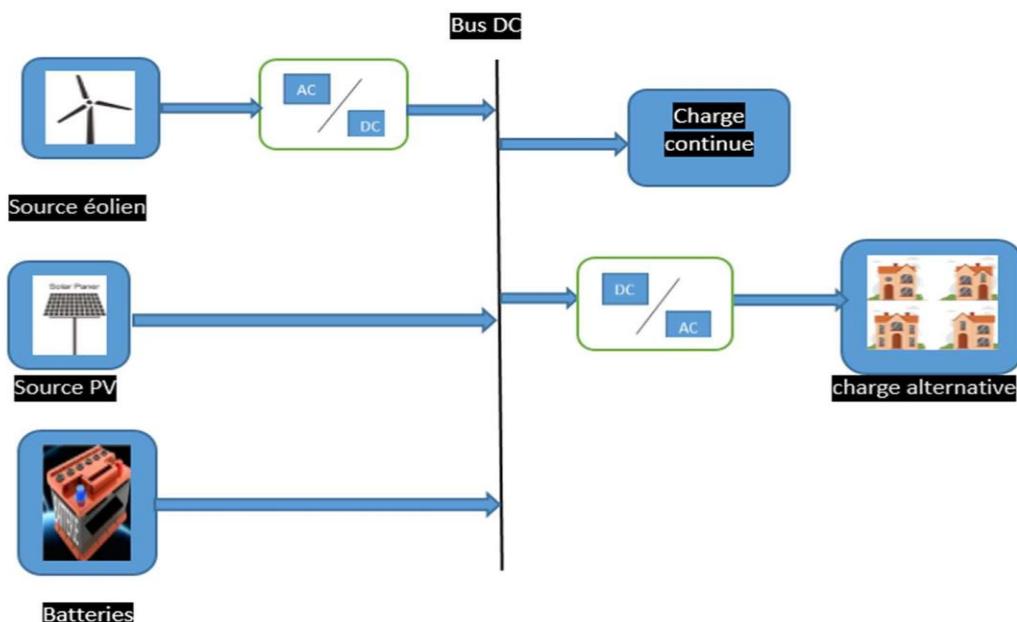


Figure I.5: schéma d'un système hybride PV-éolienne

I.5.2. Hybride Solaire-Hydraulique:

Cette combinaison associe l'énergie solaire (photovoltaïque ou thermique) à l'énergie hydraulique, souvent issue de microcentrales ou de systèmes de pompage-turbinage. Elle est adaptée aux zones où des ressources hydrauliques sont présentes en complément d'un fort potentiel solaire[6].

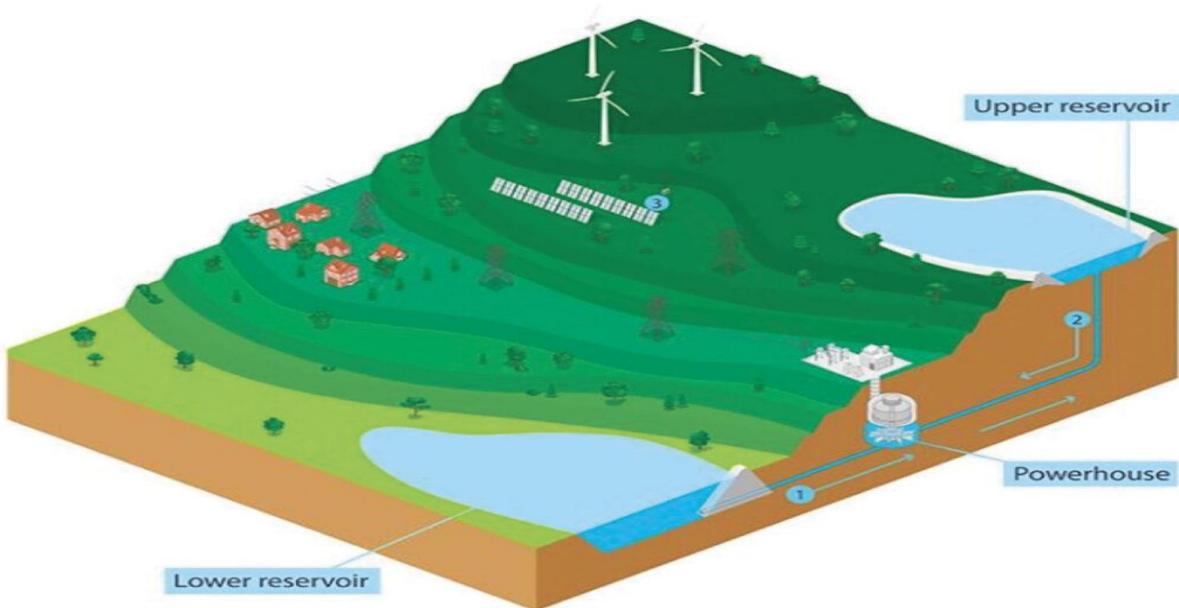


Figure I. 6: système hybride solaire-hydraulique(step)

I.5.3. Système hybride photovoltaïque-batterie et pile à combustible:

Dans ce système on a remplacé la source éolienne par la pile à combustible.

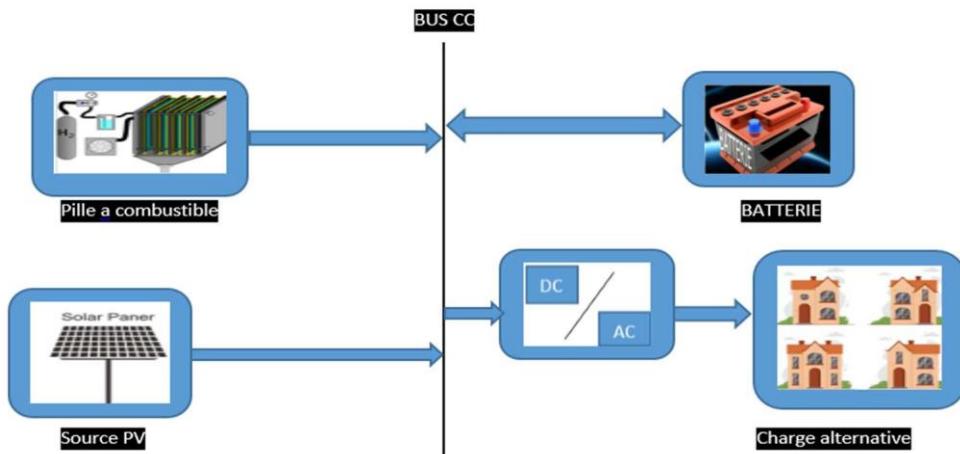


Figure I. 7 : schéma d'un système hybride PV-Batterie-PAC.

I.5.4. Système hybride photovoltaïque –éolien-diesel:

Le système hybride combine l'énergie produite par des panneaux solaires et/ou des éoliennes avec celle provenant d'autres sources. En général, il est composé d'une éolienne et

d'un groupe électrogène de secours fonctionnant au diesel, au propane ou à l'essence. Ce type de système peut être adapté pour alimenter une résidence ou un immeuble commercial qui n'est pas raccordé au réseau électrique central. La plupart des systèmes hybrides incluent une batterie de stockage d'énergie, comme indiqué sur la figure suivante [7].

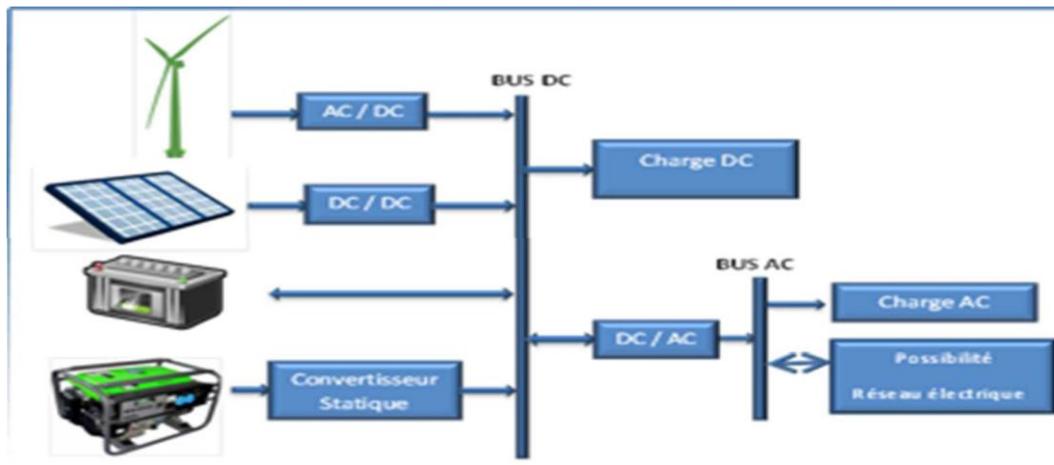


Figure I. 8: Schéma d'un système hybride éolien – PV – DIEZEL

I .6. Avantages et inconvénients d'un système hybride:

I .6.1. Avantages:

- ✓ La disponibilité d'énergie
- ✓ Adaptable à une charge évolutive, avec un fonctionnement simple et nécessitant peu d'entretien et de révision [8].
- ✓ Coûts réduits tout au long du cycle de vie de l'application
- ✓

I .6.2. Inconvénients:

- ✓ La production des modules photovoltaïques exige une technologie de pointe et un coût important [9].

I .7. Conclusion:

Dans ce chapitre, on a décrit quelques généralités sur les différents systèmes hybrides, les avantages et les inconvénients des systèmes hybrides ainsi que les différentes sources d'énergies renouvelables qui peuvent être combinées pour avoir un système hybride.

Chapitre II

modélisation du système étudié

II.1 Introduction :

Nous avons vu dans le premier chapitre quelques généralités sur les différentes architectures des systèmes hybrides à énergies renouvelables.

Nous avons défini le système hybride a étudié qui se compose d'un générateur photovoltaïque , une pile à combustible et une source de stockage (batteries).

La modélisation de ce système va nous permettre de traduire en équations le comportement de ce dernier afin de pouvoir comprendre son fonctionnement, faciliter son dimensionnement et éventuellement simuler par la suite son évolution.

II.2. Modélisation d'un générateur photovoltaïque :

Les cellules solaires sont généralement associées en série et en parallèle, puis encapsulées sous verre pour obtenir un module photovoltaïque. Un générateur PV est constitué de modules interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique usuel. Les modules PV sont habituellement branchés en série-parallèle pour augmenter la tension et l'intensité à la sortie du générateur. Les modules interconnectés sont montés sur des supports métalliques et inclinés suivant l'angle désiré en fonction du lieu, cet ensemble est souvent désigné par champ de modules [10].

II .2.1.Modèle a une diode :

Le fonctionnement d'un module photovoltaïque est décrit par le modèle « standard» à une diode établit par Shokley pour une seule cellule PV, est généralisé à un module PV qui est considéré comme un ensemble de cellules identiques branchées en série ou en parallèle [11].

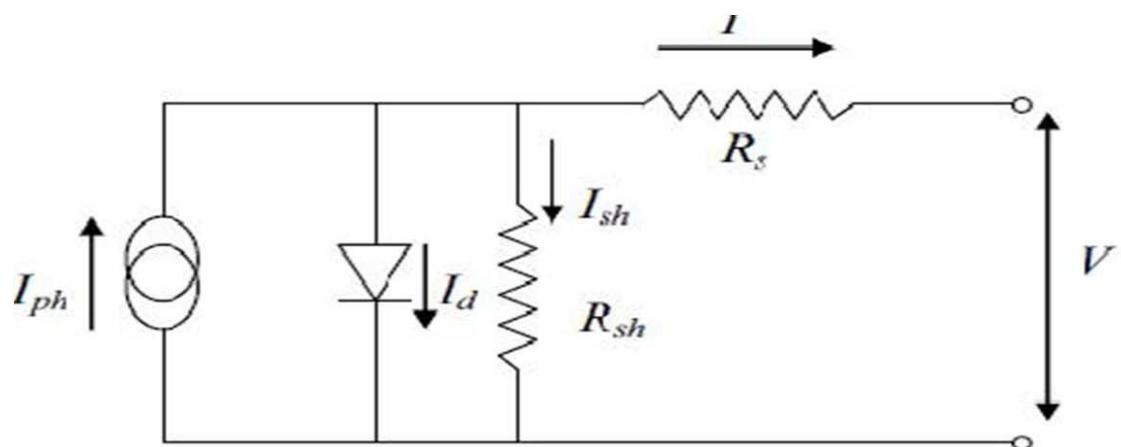


Figure .II. 1: schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode[11].

Le courant fourni par la cellule est donné par la relation :

$$I = I_{PH} + \frac{V - R_{SI}}{R_{sk}} + I_s \left[\exp \left\{ \frac{q(V - R_{SI})}{AKT} \right\} - 1 \right] \quad (II.1)$$

Il faut noter que ces deux résistances sont liées à la technologie d'élaboration des électrodes. Il faut minimiser R de telle sorte que R soit très important, Le photo courant I varie avec l'irradiance, il est déterminé par rapport à des valeurs données aux conditions de référence :

$$I_{ph} = \frac{\phi}{\phi_{ref}} \cdot [I_{ph,ref} + \mu_{isc} \cdot (T - T_{ref})] \quad (II.2)$$

μ : Coefficient de température du photo courant (ou courant de court-circuit), il est souvent donné par le fabricant, il est en général positif mais très faible. Le courant de saturation de la diode est supposé variable avec la température selon l'expression :

$$I_s = I_{s,ref} \cdot \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[\left(\frac{q \cdot E_g}{AK} \right) \cdot \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (II.3)$$

D'où Les conditions de référence Φ et Φ_{ref} sont les conditions extérieures pour lesquelles sont spécifiées les données de base utilisées pour l'établissement du modèle (Veff, Ieff, Vmax, Imax), se sont soit les spécifications du fabricant, toujours données aux STC (Standard test conditions).

II .2.2.Modèle à deux diodes :

Nous avons, cette fois-ci, deux diodes pour représenter les phénomènes de polarisation de la jonction PN. Ces diodes symbolisent la recombinaison des porteurs minoritaires, d'une part en surface du matériau et d'autre part dans le volume du matériau. Le schéma du générateur photovoltaïque devient dans le cas de Figure I.2 Test Conditions, 1000 W/m², 25°C, spectre AM1,5), soit des valeurs issues d'une mesure du module [11].

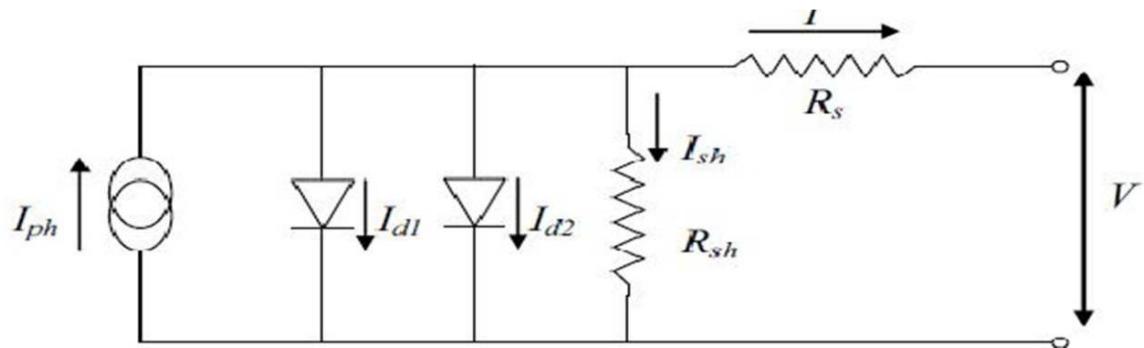


Figure .II. 2: schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à deux diodes.

Le courant fourni par la cellule est donné par la relation :

$$I = -I_{ph} + \frac{V - R_s I}{R_{sh}} + I_{s1} \left[\exp \left\{ \frac{q(V - R_s I)}{A K T} \right\} - 1 \right] + I_{s2} \left[\frac{q(V - R_s I)}{2 A K T} \right] - 1 \quad (II.4)$$

$Id(V)$: courant d'obscurité de la diode, Cette relation entre les trois grandeurs, I , I et $Id(V)$ représente la caractéristique courant tension idéale permettant de déterminer quatre grandeurs caractéristiques principales du fonctionnement des cellules solaires :

Le courant de court-circuit I_c ;

La tension en circuit ouvert V_o ;

Le facteur de forme FF ;

Le rendement de conversion d'énergie h .

II .2.3.Caractéristique courant tension et schéma équivalente :

Il est difficile de donner un caractère source de courant ou de tension à un panneau photovoltaïque sur toute l'étendue de la caractéristique courant tension. Le panneau photovoltaïque est donc à considérer comme une source de puissance. On s'aperçoit alors de l'existence d'un point P_{max} où la puissance se trouve être maximale. Il est sans aucun doute intéressant de se placer sur ce point pour tirer le maximum d'énergie et ainsi exploiter au mieux la puissance crête installée. Certains régulateurs solaires réalisent donc une adaptation d'impédance pour qu'à chaque instant on se trouve proche de ce point de puissance maximale.

La caractéristique réelle et le schéma équivalent de la cellule sont représentés sur la figure (II.3) Les valeurs respectives des divers éléments du schéma équivalent déterminent les performances de la cellule réelle [12].

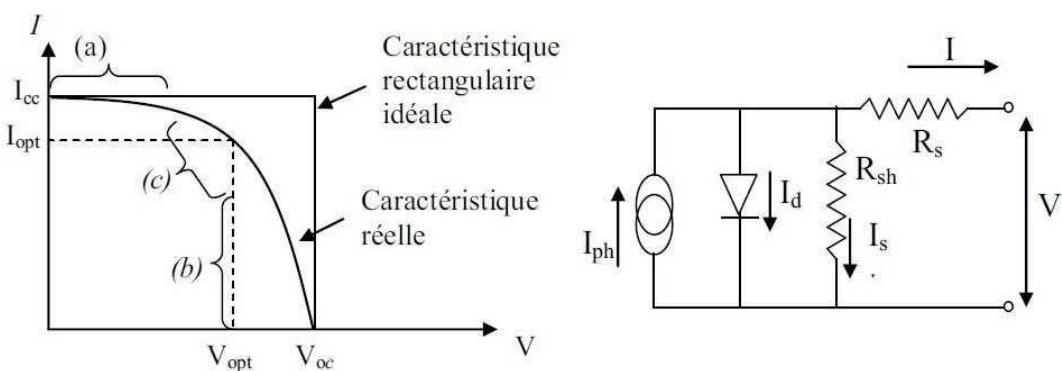


Figure .II. 3: Les différentes zones de fonctionnement d'un module photovoltaïque

- La zone (a) où la cellule se comporte comme un générateur de courant I proportionnel à l'éclairement.
- La zone (b) où la cellule se comporte comme un générateur de tension V
- La zone (c) où l'impédance interne du générateur varie rapidement.

a) Courant de court-circuit

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant $V=0$ dans le schéma équivalent). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température [13].

b) Tension à circuit ouvert

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse.

$$V_{oc} = \frac{KT}{e} \left[\exp \left[\frac{(V - R_{sh}I)}{AKT} \right] - 1 \right] \quad (\text{II.5})$$

c) Facteur de forme, FF

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairement dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale (notée P_{max}) pour un point de fonctionnement PM ($I_m V_m$) de la courbe courant-tension (courants compris entre 0 et I et tension comprise entre 0 et V). Ce point PM est obtenu en modifiant la valeur de la résistance externe, quand l'aire du rectangle défini par les axes Ox , Oy et les droites $x = I_m$ et $y = V_m$ passe par un maximum. Le nom "facteur de forme" (filler factor) dérive de la représentation graphique. Il est défini par la relation suivante [14] :

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} \times I_{cc}} = \frac{V_m \times I_m}{V_{oc} \times I_{cc}} \quad (\text{II.6})$$

Sachant que la puissance maximale délivrée à la charge est présentée par le rectangle hachuré

$$P_m = V_m \times I_m \quad (\text{II.7})$$

d) Rendement de conversion η

Le rendement, η des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} .

$$\eta = \frac{m}{Pin} = \frac{FF \times Voc \times Icc}{Pin} \quad (II.8)$$

Pin : Puissance incidente

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court circuit et la tension à circuit ouvert.

II.2.4.L'influence de l'éclairement sur un panneau photovoltaïque :

II.2.4.1.L'influence de l'éclairement sur le fonctionnement d'un panneau photovoltaïque :

L'énergie électrique produite par une cellule photovoltaïque dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. La figure suivante représente la caractéristique courant PV solaire en fonction de l'éclairement, à une température ambiante constante. On remarque que la tension correspondant à la puissance maximale ne varie que très peu en fonction de l'éclairement, contrairement au courant qui augmente fortement avec l'éclairement [15].

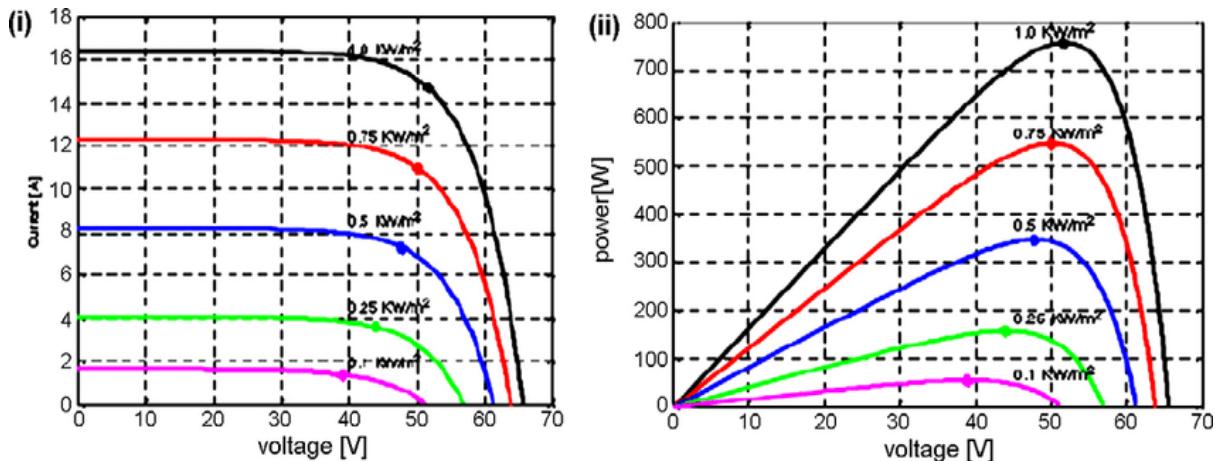


Figure .II. 4 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V) et P(V) à T=25°C

II.2.4.2.L'influence de la température sur le fonctionnement d'un panneau photovoltaïque :

Les caractéristiques électriques d'une cellule PV dépendent de la température de la jonction au niveau de la surface exposée. Le comportement de la cellule PV en fonction de la température est complexe. Les courbes suivantes représentent l'évolution du courant et de la tension en fonction de la température de jonction de la cellule, les autres conditions extérieures restant fixes [16].

Lorsque la température augmente, la tension diminue alors que le courant augmente. Dans le cas d'une cellule au silicium, le courant augmente d'environ $0,025 \text{ mA/cm}^2/\text{°C}$ alors que la tension décroît de $2,2 \text{ mV/°C}$. La baisse globale de puissance est d'environ de 0,4% par degré $^{\circ}\text{C}$. Ainsi, plus la température augmente et moins la cellule est performante [17].

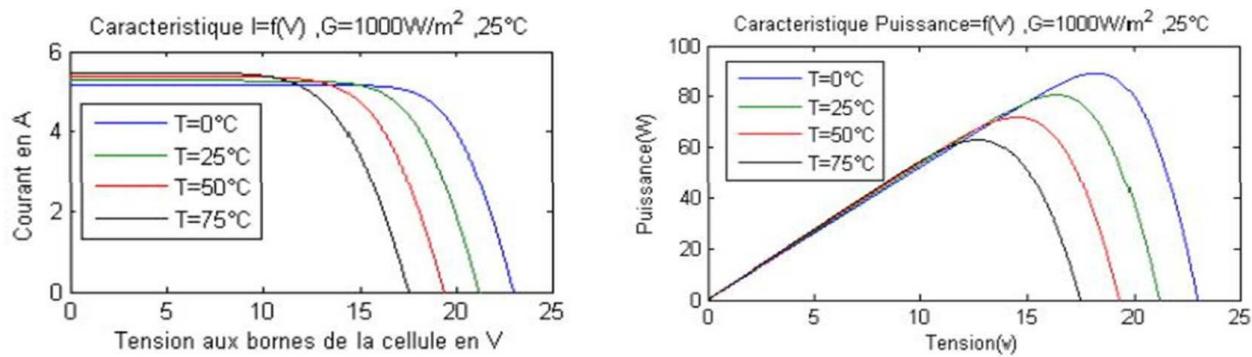


Figure .II. 5: Courbe $I(V)$ et $P(V)$ pour différentes Température[16].

Avec l'augmentation de la température, le courant de court-circuit de la cellule augmente, tandis que la tension du circuit ouvert diminue. L'effet de la température sur la puissance est quantitativement évalué en examinant les effets sur le courant et la tension séparément. Soit I_0 et V_0 respectivement le courant de court-circuit et la tension du circuit ouvert à la température de référence ($25^\circ C$) [18].

II.3 Commande du système photovoltaïque au point de puissance maximale :

Dans cette partie, nous présentons un algorithme de commande P&O de poursuite de la puissance maximale délivrée par le générateur photovoltaïque.

a. Méthode de perturbation et d'observation (P&O)

C'est la méthode la plus utilisée vu sa simplicité. Une boucle de retour et peu de mesures sont nécessaires. La tension aux bornes des panneaux est volontairement perturbée d'une faible amplitude (augmentée ou diminuée) puis la puissance est comparée à celle obtenue avant perturbation. Précisément, si la puissance aux bornes des panneaux est augmentée à cause de la perturbation, la suivante est faite dans la même direction (cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du MPP). Réciproquement, si la puissance diminue, la nouvelle perturbation est réalisée dans le sens opposé [19].

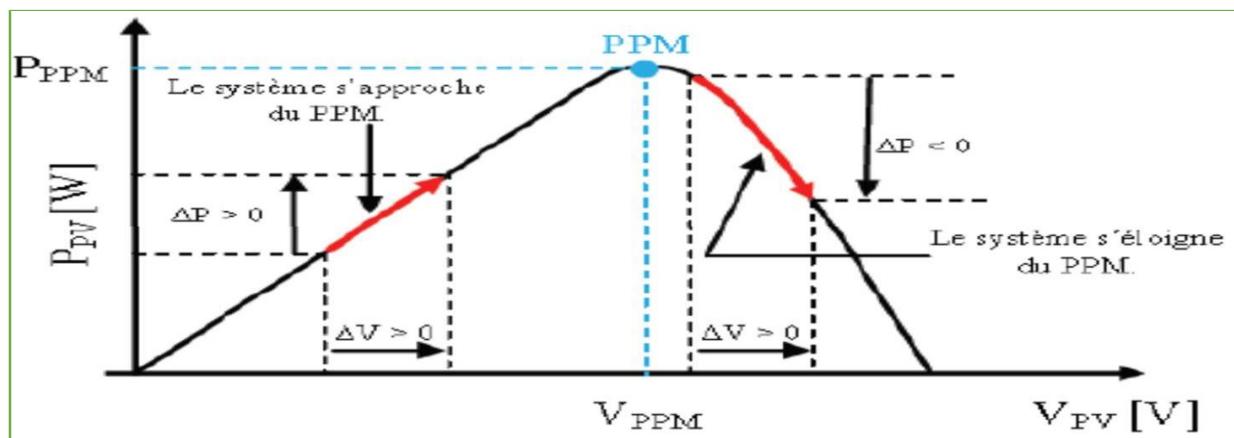


Figure .II. 6: Caractéristique $P_{PV}(V_{PV})$ et fonctionnement de la méthode Perturbation et Observation

L'algorithme général de cette commande est donné par la figure suivante :

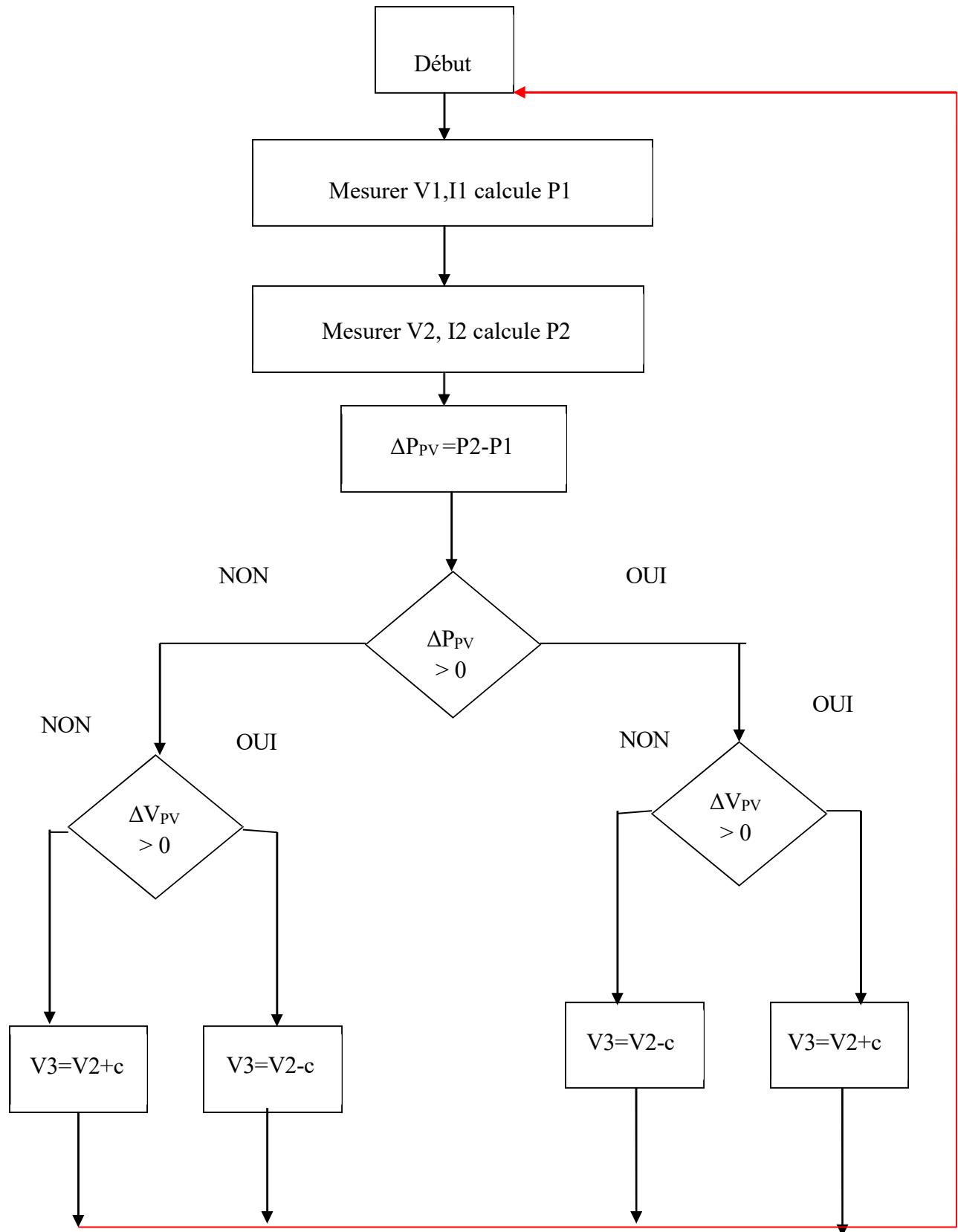


Figure .II. 7 : Organigramme de la méthode perturbation et observation.

Un organigramme de fonctionnement de cette méthode est montré dans la (figII.7). Les avantages de cette méthode peuvent être récapitulés comme suit ; la connaissance des caractéristiques du générateur photovoltaïque n'est pas exigée, c'est une méthode relativement simple. Néanmoins, en régime permanent, le point de fonctionnement oscille autour du MPP, provoquant ainsi une perte d'énergie.

II.4. Les convertisseurs DC-DC (hacheurs) :

Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé.

Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs.

a. Hacheur survolteur

Ce dernier est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de « boost » ou hacheur parallèle ; son schéma de principe de base est celui de la (fig.II.8). Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieur.

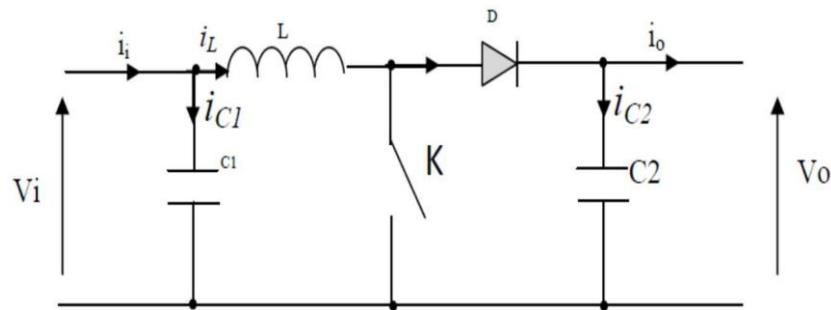


Figure .II. 8: Schéma de principe d'un convertisseur Boost

L'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents du convertisseur survolteur (voir fig.II.9) des deux phases de fonctionnement donne :

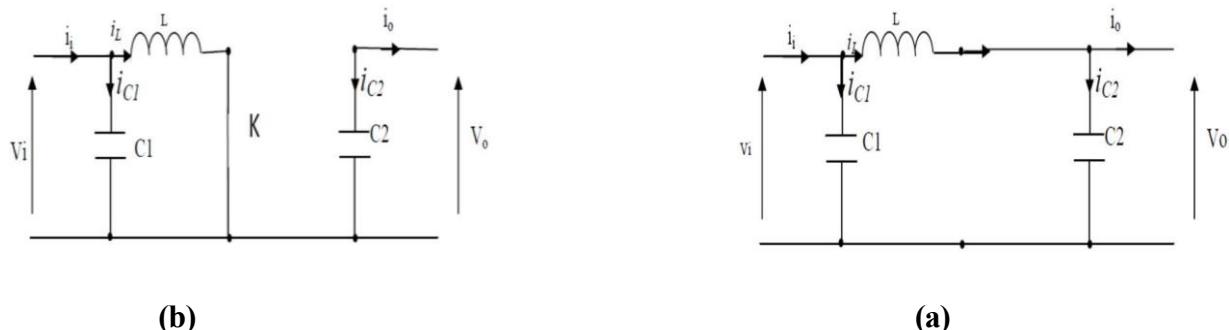


Figure .II. 9: Schémas équivalents du hacheur survolteur, (a) : K fermé, (b) : ouvert

Pour la première période d.Ts

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = -i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = -V_i(t) \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (II.9) \\ (II.10) \\ (II.11) \end{array}$$

Pour la deuxième période (1-d) Ts

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{dI_L}{dt} = V_i(t) - V_0(t) \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (II.12) \\ (II.13) \\ (II.14) \end{array}$$

En appliquant ces relations sur les systèmes d'équations, on trouve le modèle approximé du convertisseur survoltage :

$$\left\{ \begin{array}{l} i_L = i_i - C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} \\ i_0 = C_2 \frac{dV_i(t)}{dt} \\ V_i = L \frac{di_L}{dt} + (1-\alpha)V_0 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (II.15) \\ (II.16) \\ (II.17) \end{array}$$

II.5. pile à combustible :

II.5.1. Historique :

L'origine de la découverte de la pile à combustible c'était l'électrolyse de l'eau par les chimistes Anglais William Nicholson et Johann Ritter à la fin du 18ème siècle dont l'électrolyse

de l'eau consiste à transformer l'eau (H_2O) en dihydrogène (H_2) et dioxygène (O_2).

Le principe de la pile à combustible (PAC) a été découvert par Sir William Grove, un professeur de philosophie expérimentale à l'Institut Royal de Londres. Celui-ci expérimente en 1839 la première cellule électrochimique fonctionnant avec de l'hydrogène comme carburant et des électrodes de platine poreux en milieu d'acide sulfurique, mettant ainsi en évidence la possibilité de produire du courant électrique par conversion directe de l'énergie chimique du combustible[20].

Durant les années 1930 l'anglais F.T. Bacon entreprend de développer un dispositif opérationnel à partir de l'expérience de Grove. Ses travaux aboutissent vingt plus tard à la réalisation d'une pile d'une puissance d'un kW.

La consécration surviendra en 1965 quand on apprend que les astronautes des capsules consomment l'eau produite par les générateurs électriques de leur vaisseau. Ces générateurs sont les premières piles à combustibles ayant une utilisation réelle.

II .5.2.Principe de fonctionnement :

La pile à combustible de type PEM convertit l'énergie chimique (l'hydrogène et oxygène) en énergie électrique. Cette réaction électrochimique est une électrolyse de l'eau inverse. L'énergie électrique est produite par une réaction d'oxydoréduction entre l'oxygène (oxydant) et l'hydrogène (réducteur). L'oxydation à lieu à l'anode et la réduction à la cathode. Ces deux réactions sont isolées par une membrane qui joue le rôle d'électrolyte. La cathode est alimentée en oxygène gazeux (ou plus généralement en air) et l'anode est alimentée en hydrogène gazeux. Les équations chimiques d'oxydoréductions sont les suivantes :

- Oxydation à l'anode :



- Réduction à la cathode :



- En combinant (III.1) et (III.2), la réaction globale est :



L'électricité est produite par les 2 électrons libérés par la molécule d'hydrogène. Les Protons d'hydrogène H^+ traversent la membrane séparant l'anode de la cathode et se recombinent à la cathode avec les électrons et les atomes d'oxygène. Idéalement, les seuls produits secondaires de la réaction sont de l'eau et de la chaleur, faisant de la pile un tri-générateur.

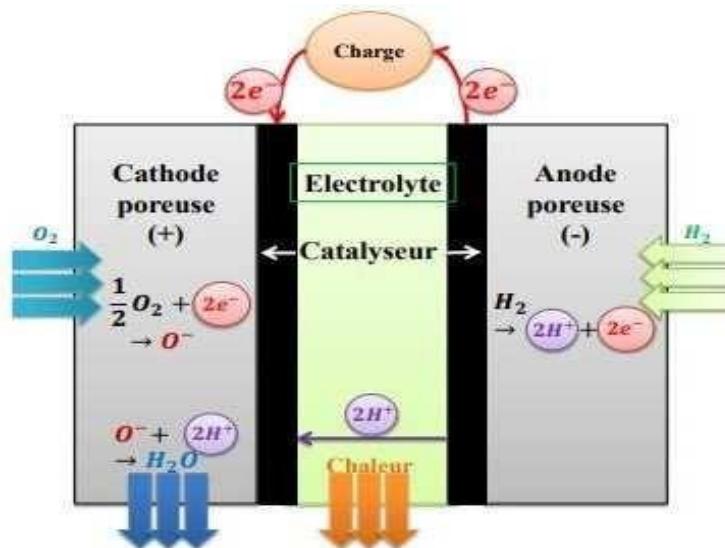


Figure .II. 10: Schéma de principe d'une cellule de pile de type PEMFC.

II .5.3.Modèle de la pile à combustible type PEM :

Le but principal de créer un modèle de pile à combustible est d'obtenir la tension de sortie, la puissance et l'efficacité en fonction du courant de charge réel.

La Figure ci-dessous (II.12) présente Schéma équivalent de pile à combustible PEM

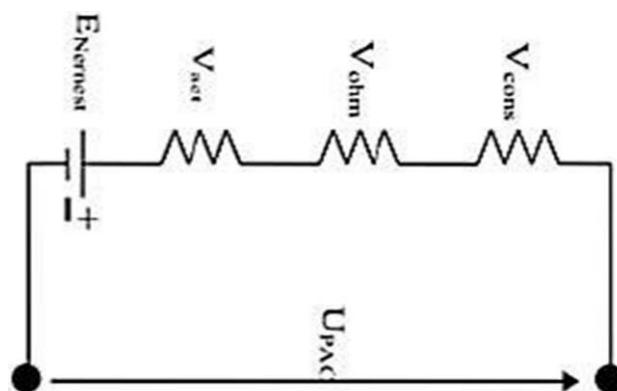


Figure .II. 11 : Schéma équivalent de la pile à combustible

On a:

$$V_{PAC} = ENernst - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (II.18)$$

V_{act} : polarisation active

V_{ohm} : polarisation ohmique

V_{conc} : polarisation de concentration

$$ENernst = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3} \times (T - 298.15) + 4.31 \times 10^{-5} \times [\ln(P^*_{H2}) + \frac{1}{2} \ln(P^*_{O2})] \quad (II.19)$$

T : température opératoire de la pile (K) .

P^*_{H2} : pression partielle à l'interface de l'hydrogène (atm).

P^*_{O2} : pression partielle à l'interface de l'oxygène(atm).

a) Polarisation d'activation :

Les pertes d'activation sont dues au démarrage des réactions chimiques, ils sont essentiellement dus aux réactions cathodiques.

La relation entre les pertes d'activation et la densité de courant est exprimé dans l'équation suivante :

$$V_{act} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \times T + \varepsilon_3 \times T \times \ln(C^*_{O2}) + \varepsilon_4 \times T \times \ln(I_{PAC}) \quad (II.20)$$

I_{PAC} : courant de fonctionnement de la pile (A)

$$C^*_{O2} = \frac{P^*_{O2}}{(5.08 \times 10^6 \times e^{-\left(\frac{498}{T}\right)})} \quad (II.21)$$

C^*_{O2} :représente les concentrations d'oxygène(mol / cm^3) dissout dans un film d'eau à l'interface de la membrane gaz/liquide sur la surface catalytique de la cathode , elle est exprimé en fonction de sa pression par la loi de henry .

Etant donné qu'on utilise de l'oxygène pur , donc :

$$P^*_{O2} = P_{cath} \times (1 - x_{H_2O}^{\text{Sat}}) \quad (II.22)$$

P_{cath} : la pression de l'oxygène à la cathode

$x_{H_2O}^{Sat}$: la fraction molaire de saturation de l'eau dans le gaz humidifié et supposé \approx à 50 % , on obtient alors :

$$P_{O_2}^* = P_{cath} \times \left(\frac{1}{2}\right) \quad (\text{II.23})$$

A l'anode, on utilise de l'hydrogène pur, qui ne contient pas de monoxyde de carbone.

$$P_{H_2}^* = P_{anode} \times \left(1 - \frac{1}{2} \cdot x_{H_2O}^{Sat}\right) \quad (\text{II.24})$$

P_{anod} : est la pression de l'oxygène à l'anode.

$$P_{H_2}^* = P_{anode} \times \left(\frac{3}{4}\right) \quad (\text{II.25})$$

b) polarisation ohmique :

Les pertes ohmiques sont dues à la résistance qu'opposent les électrodes et les plaques bipolaires à la circulation des électrons et l'électrolyte au passage des protons. La chute de tension correspondante s'écrit :

$$V_{ohm} = I_{PAC} \times (R_M + R_C) \quad (\text{II.26})$$

R_C : est la résistance équivalente de contact à la conduction des électrons

R_M : est la résistance équivalente de la membrane à la conduction des protons, elle est calculée à partir de la relation suivante :

$$R_M = \frac{l \times r_M}{A} \quad (\text{II.27})$$

Où l est l'épaisseur de la membrane (μm), r_M est la résistance spécifique de la membrane, obtenue par la relation suivante :

$$r_M = \frac{181.6 \times [1 + 0.03 \times \left(\frac{I_{PAC}}{A}\right) + 0.062 \times \left(\frac{T}{303}\right)^2 \times \left(\frac{I_{PAC}}{A}\right)^{2.5}]}{[\delta_{H_2O}/S03^- - 0.634 - 3 \times \left(\frac{I_{PAC}}{A}\right) \times \exp[4.18 \times \left(\frac{T-303}{T}\right)]]} \quad (\text{II.28})$$

Le terme $\frac{181.6}{[\delta_{H_2O}/S03^- - 0.634]}$ représente la résistance spécifique de la membrane ($\Omega \cdot \text{cm}$) à

$I_{PAC}=0$ et à une température de 30 °C ($T = 303$ K). Le terme exponentiel au dénominateur est le facteur de correction si cette dernière n'est pas à 30°C

$\delta_{H_2O}/S03^-$ est teneur en eau dans la membrane, admettant une valeur minimale et maximale

respectivement de 0 et de 22

A : est la surface active de la pile (cm^3)

En remplaçant les relations, l'expression de polarisation ohmique devient :

$$V_{\text{ohm}} = \frac{I_{\text{PAC}}}{A} \left[\frac{181.6 \times \left[1 + 0.03 \times \left(\frac{I_{\text{PAC}}}{A} \right) + 0.062 \times \left(\frac{T}{303} \right)^2 \times \left(\frac{I_{\text{PAC}}}{A} \right)^{2.5} \right]}{\left[\delta_{\text{H}_2\text{O}}/\text{S}03^- - 3 \times \left(\frac{I_{\text{PAC}}}{A} \right) \right] \times \exp \left[4.18 \times \left(\frac{T-303}{T} \right) \right]} \times 1 + A \times R_C \right] \quad (\text{II.29})$$

c) Polarisation de concentration

Les chutes de tension par concentration résultent d'un manque de réactifs. Lorsque la densité de courant devient élevé la diffusion des gaz dans les électrodes n'est plus assez rapide pour entretenir la réaction. Ces pertes sont données par la relation suivante :

$$V(\text{conc}) = -B \left(1 - \frac{J}{J_{\text{max}}} \right) \quad (\text{II.30})$$

est la densité de courant du fonctionnement permanente (A/cm^2), J_{max} est la densité de courant

maximale. Par conséquent, la tension (E_s) de (n) piles unitaires reliées en série formant un assemblage

$$E_s = n \times E_{\text{PAC}} \quad (\text{II.31})$$

On remplace les expressions des pertes dans l'équation (1), et on obtient le potentiel réel global de la pile à combustible PEMFC, par l'équation suivante :

$$\begin{aligned} U_{\text{PAC}} = & 0.28176 - 0.85 \times 10^{-3}(T - 298.15) \\ & + 4.3081 \\ & \times T \left[\ln \left(\frac{3}{4} P_{\text{anode}} \right) + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1}{2} P_{\text{cath}} \right) \right] \\ & + [2.86 \times 10^{-3} + 2 \times 10^{-4} \ln(A) + 4.3 \times 10^{-5} \ln \left(\frac{0.75 P_{\text{anode}}}{1.091 \times 10^6 \times \exp \left(\frac{77}{T} \right)} \right) T + \\ & 7.6 \times 10^{-5} \ln \left(\frac{0.5 P_{\text{cath}}}{5.08 \times 10^6 \times \exp \left(\frac{-498}{T} \right)} \right) - 1.93 \times 10^{-4} T \times \ln(I_{\text{PAC}}) - \\ I_{\text{PAC}} & \left[\frac{181.6 [1+0.03(I_{\text{PAC}})+0.062(\frac{T}{303})^2(\frac{I_{\text{PAC}}}{A})^{2.5}]}{A[\delta_{\text{H}_2\text{O}}/\text{S}03^- - 3 \times (\frac{I_{\text{PAC}}}{A})] \times \exp [4.18 \times (\frac{T-303}{T})]} \right] l + R_C \right] + B \left(1 + \frac{J}{J_{\text{max}}} \right) \quad (\text{II.32}) \end{aligned}$$

II .5.4.Caractéristique électrique de la pile à combustible :

La tension à vide de la cellule est en fonction du potentiel électrochimique de la réaction d'oxydoréduction. Idéalement, ce potentiel électrochimique est de 1.23 v (potentiel standard) pour des conditions standard de température et de pression (1atm, 25°C).en pratique, la tension à vide se situe légèrement en dessous de 1v. La courbe de polarisation est la caractéristique électrique d'une pile à combustible .elle représente la tension de la cellule en fonction de la densité de courant et dépend de la température de fonctionnement, de la pression des réactifs et du taux d'humidité de la membrane .La densité de courant (A/cm²) est définie par[20] :

$$i_{PAC} = \frac{I_{pac}}{A_{cell}} \quad (II.33)$$

Avec I_{pac} le courant de la pile à combustible et A_{cell} la surface active d'une membrane.

II .5.5.Avantages et inconvénients de la PAC :**II .5.5.1.Avantages :****➤ Rendement**

Le haut rendement énergétique même à charge partielle. Le rendement électrique dépend du type de pile. Il varie entre 40 % et 70 % sans tenir compte du système global avec les auxiliaires (pompes, échangeur, reformeur, humidificateur et convertisseur) qui font baisser ces valeurs. Dans les applications de transport, le rendement d'une pile PEM est compris entre 38 % (reformage du méthanol) et 50 % (hydrogène pur). Cependant, dans les applications stationnaires, le rendement énergétique global est bien plus élevé car l'énergie non convertie sous forme électrique peut être récupérée sous forme de chaleur. On peut atteindre des rendements globaux de 85 % à 90 %.

➤ Silencieuses

Les faibles émissions sonores car lors de leur fonctionnement,

➤ Pollution

Les faibles émissions gazeuses (selon le carburant utilisé et son origine). Les piles fonctionnant à l'hydrogène pur ne produisent rien tandis que celles utilisant du méthanol ou de l'éthanol produisent de faibles quantités de CO₂, de CH₄ et de CO.

➤ Modularité

Les piles sont constituées de cellules élémentaire mises en parallèle ou en série pour obtenir la puissance voulue. Il est donc possible d'adapter le nombre de cellules ainsi que la surface de

chacune d'obtenir toutes les puissances possibles entre 1 KW et plusieurs MW.

➤ Température de fonctionnement

Les diverses températures de fonctionnement. Les PAC possèdent une large plage de températures de fonctionnement selon leurs types. Ceci permet de couvrir plusieurs domaines d'application. Par exemple, les piles de faible température sont utilisées pour les applications mobiles ou portables qui n'ont pas besoin de la chaleur produite. En revanche, les piles à haute température sont plus adéquates aux applications domestiques où la chaleur dégagée est utilisée pour l'eau chaude et le chauffage. Elles conviennent aussi aux applications industrielles où la chaleur produite est exploitée pour un couplage avec une turbine.

➤ L'absence de parties rotatives

Il n'y a aucune partie rotative dans une pile à combustible et aucun mouvement donc, pas d'usure mécanique pour le cœur de la pile.

II .5.5.2.Inconvénients :

En effet, parmi les problèmes principaux faisant obstacle au développement des piles à combustible :

➤ Le coût

Le coût qui est très élevé à cause de l'utilisation des métaux nobles comme le platine au niveau des électrodes et à cause du prix de fabrication de la membrane et des plaques bipolaires.

➤ Duré de vie

La plupart des piles sont encore des prototypes, on a donc peu de renseignements sur la durée de vie des piles. Les contraintes diffèrent selon l'application :

- Automobile : quelque millier d'heures
- Stationnaire : au moins 40 000 heures (environ 4.6 ans).

➤ Gestion thermique

Le module pile à combustible doit encore être intégré au reste du système. Dans le cas des applications automobiles, il faut évacuer la chaleur générée par la pile (pour éventuellement l'utiliser pour le reformage). Cela impose donc un système de refroidissement.

II.6 Système de Batterie :

II .6.1.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.11):

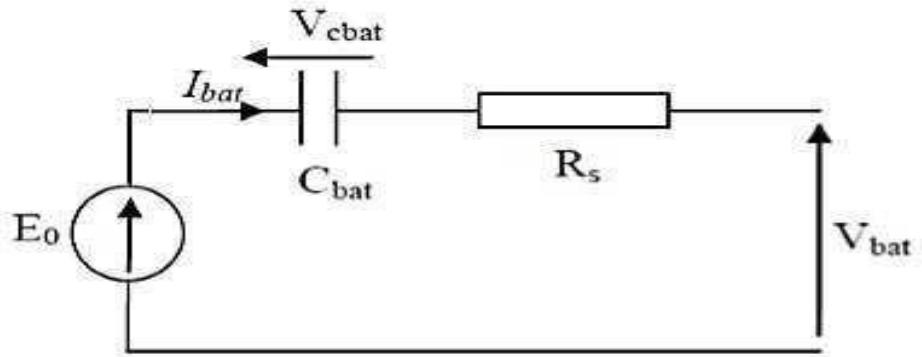


Figure .II. 12: Modèle R-C de la batterie.

On a donc :

$$V_{bat} = E_0 - R_s * I_{bat} - V_{cbat} \quad (\text{II.34})$$

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.

$$SOC = \frac{(1 - \frac{Q_{batt}}{C_{batt}}) * 100}{C_{batt}} \quad (\text{II.35})$$

Tell que :

$$Q_{bat} = I_{bat} * t_{batt} \quad (\text{II.36})$$

$$c_{bat} = \frac{Q_{batt}}{V_{bat}} \quad (\text{II.37})$$

On peut écrire les équations suivantes :

$$E'_0 = N_s * E_0 \quad (\text{II.38})$$

$$C'_0 = \frac{N_p * c_{batt}}{N_s} \quad (\text{II.39})$$

$$R_s = \frac{N_p * R_s}{N_s} \quad (\text{II.40})$$

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

$$c_{bat} = \frac{E_{bat} * N_i}{V_{bat} * n_{bat} * D} \quad (\text{II.41})$$

II .6.2.Hacheur parallèle réversible en courant :

Le convertisseur de puissance est nécessaire comme interface entre les sources secondaire d'énergie électrique et le bus continu. L'intérêt d'utiliser ce type d'interface est d'adapter les niveaux de tension des sources au bus continu. En outre, celui-ci contrôle l'énergie fournie ou absorbée par les sources en fonction de la stratégie de gestion d'énergie choisie. Le convertisseur doit être donc réversible en courant.

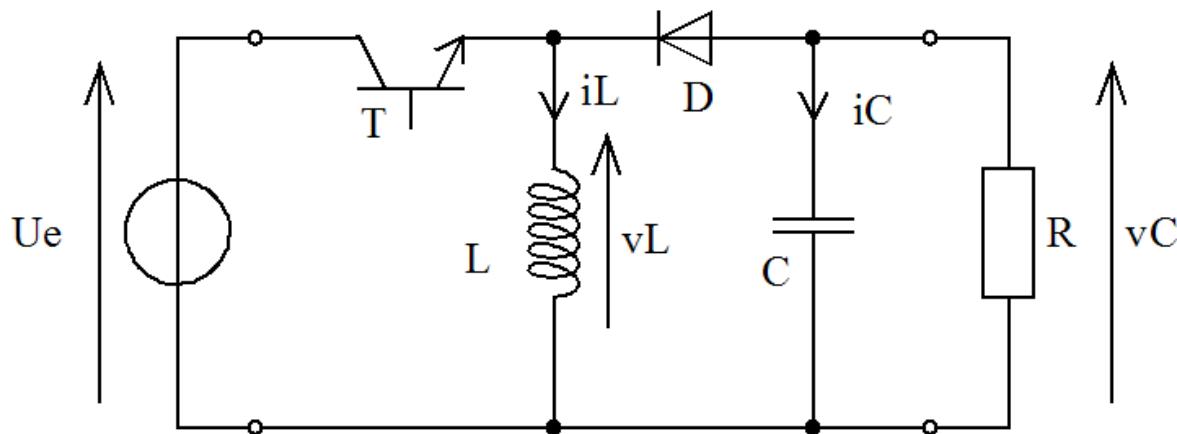


Figure .II. 13: Hacheur parallèle réversible en courant

Le comportement du hacheur réversible en courant en régime permanent est d'écrit par les équations suivantes :

$$L_{rev} \frac{diL}{dt} = V_{ES} - u_{rev} \cdot V_{DC} \quad (\text{II.42})$$

$$C \frac{dV_{DC}}{dt} = iL \cdot u_{rev} - \frac{V_{DC}}{r} - I_{DC} \quad (\text{II.43})$$

Ou : L_{rev} est l'inductance du hacheur réversible est, iL et V_{DC} sont le courant et la tension de l'élément de stockage (la batterie). r une résistance connecte en parallèle au bus DC qui représente des divers pertes. Notons aussi que la commutation des transistors est complémentaire : u_{rev} est l'ordre de commande du transistor T_1 et celle du transistor T_2 .

On obtient le modèle moyen en substituant u_{rev} avec α_{rev} .

II .7. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons modélisé les différentes parties du système hybride avec stockage, à savoir les sources d'énergie électrique notamment la PAC de type (PEMFC) et le générateur photovoltaïque avec un système de stockage (batteries), les différents convertisseurs d'électronique de puissance.

Dans le chapitre suivant nous étudierons la gestion d'énergie dans tout le système avec les différents modes de fonctionnement possible.

Chapitre III

Gestion de puissance du

système étudié

III.1 Introduction :

Dans un système hybride combinant une source photovoltaïque, une pile à combustible et une batterie, la gestion de puissance joue un rôle clé. Il ne s'agit pas seulement de produire et stocker de l'énergie, mais aussi de répondre efficacement à la demande de la charge, qui peut varier au cours du temps. Ce chapitre s'intéresse à la stratégie permettant d'équilibrer ces flux d'énergie, en tenant compte des caractéristiques propres à chaque source, tout en assurant la stabilité du système et en prolongeant sa durée de vie.

III .2. Gestion d'énergie :

Nous avons choisi la gestion de l'énergie d'un système hybride constitué d'une chaîne de conversion photovoltaïque et une pile à combustible alimentent une charge variable et le surplus d'énergie produite par le **GPV** sert à charger la batterie qui constitue notre système de stockage. L'énergie emmagasinée dans la batterie va servir à compenser le manque au niveau de la charge dans le cas où le **GPV** et la pile ne satisfait pas cette dernière.

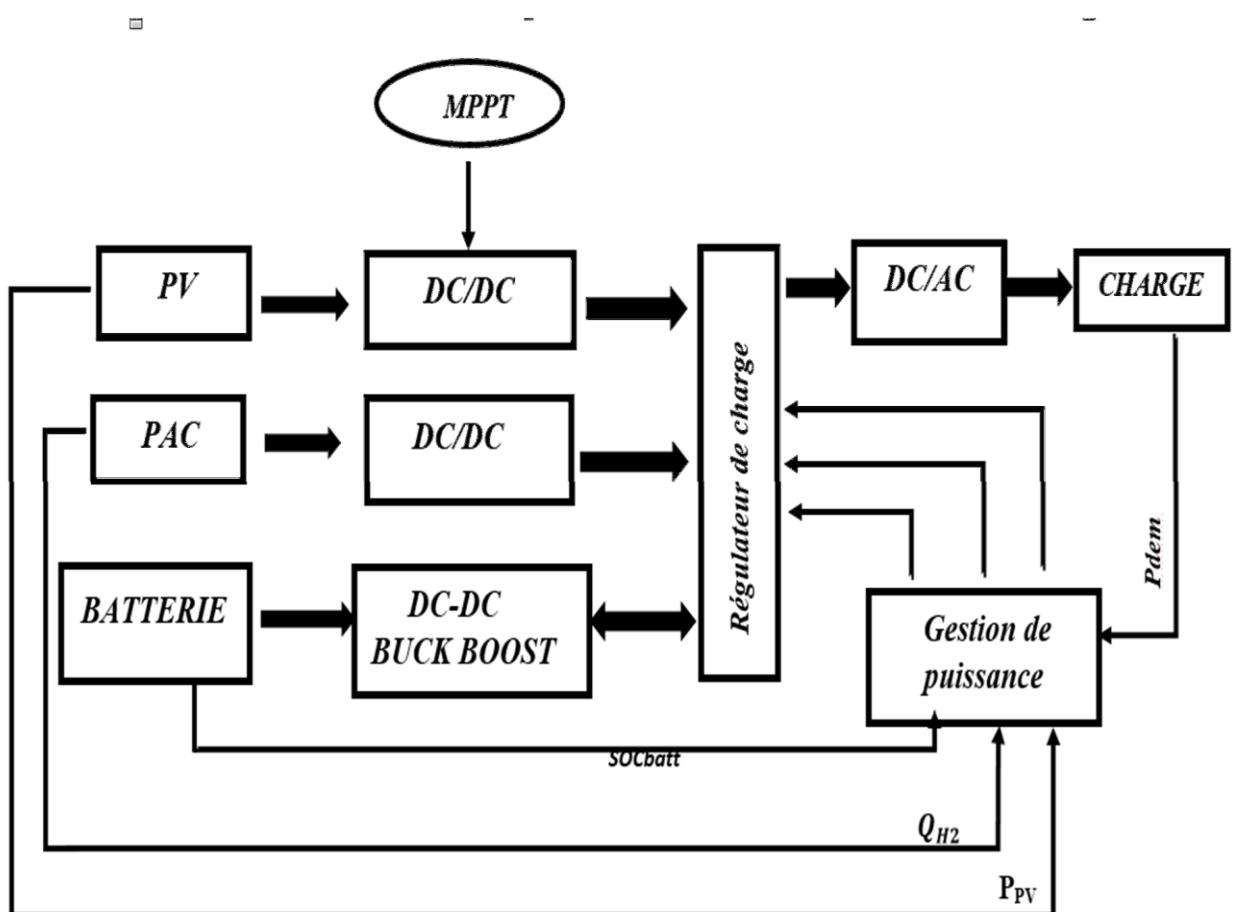


Figure .III 1: Schéma du système global étudié.

III.3 Stratégies de gestion adaptées au système étudié :

Le système hybride considéré dans cette étude est composé d'un générateur photovoltaïque (GPV), d'une pile à combustible (PAC), d'une batterie et d'une charge. L'objectif principal de la stratégie de gestion de puissance est de répartir efficacement les flux énergétiques entre les différentes sources et la charge, tout en assurant la stabilité du système, la protection des composants et la continuité d'alimentation. Le choix de la stratégie dépend principalement des contraintes du système, des priorités d'utilisation des sources et du niveau de complexité accepté pour la commande.

III.3 .1 Stratégie à base de règles :

La stratégie à base de règles repose sur des logiques simples et déterministes, établies à partir de l'état du système (état de charge de la batterie, puissance disponible du GPV, demande de la charge, etc.). Elle consiste à définir des seuils et des conditions d'activation pour chaque source. Par exemple, le GPV est utilisé en priorité pour alimenter directement la charge ; si la production solaire est insuffisante, la batterie intervient, à condition que son état de charge soit suffisant. Si la batterie est faible, la PAC prend le relais pour combler le déficit. Cette stratégie est largement utilisée pour sa simplicité de mise en œuvre, sa stabilité et sa robustesse, bien qu'elle ne soit pas optimale dans toutes les situations.

III.3 .2. Stratégie hiérarchique par priorité :

La stratégie hiérarchique repose sur une logique de priorité stricte entre les sources. Dans le cadre du système étudié, le GPV est prioritaire car il fournit une énergie gratuite et renouvelable. La batterie est utilisée en soutien, en cas d'insuffisance de production solaire, tandis que la PAC est activée uniquement lorsque les deux premières sources ne peuvent satisfaire la demande. Cette approche permet de préserver les sources les plus coûteuses ou sensibles, comme la PAC, et de maximiser l'usage des énergies renouvelables. Elle est souvent intégrée comme une extension de la stratégie à base de règles, avec un ordre d'utilisation bien défini.

III .3.3.Stratégie à base d'optimisation déterministe :

Les stratégies d'optimisation déterministes s'appuient sur des modèles mathématiques du système pour planifier l'utilisation optimale des sources à chaque instant. Le contrôle prédictif basé sur modèle MPC (« Model-Predictive Control ») en est un exemple typique : il anticipe la

production solaire, la demande de la charge et l'état des composants pour prendre des décisions optimales selon un critère donné (par exemple, minimisation du coût ou de la consommation d'hydrogène). Bien qu'offrant de très bonnes performances, cette méthode est plus complexe à implémenter, exige des prévisions fiables, et nécessite une capacité de calcul plus élevée.

III .3.4.Stratégie à base d'optimisation stochastique (apprentissage automatique) :

Cette stratégie repose sur des techniques d'intelligence artificielle telles que l'apprentissage automatique (machine learning), les réseaux de neurones ou la logique floue. Contrairement aux approches déterministes, ces méthodes peuvent s'adapter à des environnements incertains et dynamiques, comme la variabilité de la météo ou de la charge. Elles permettent au système d'apprendre à optimiser la gestion de l'énergie à partir de données passées ou en temps réel. Cependant, leur mise en œuvre est complexe et nécessite une grande quantité de données, ce qui limite leur utilisation dans les systèmes hybrides à petite échelle ou dans un cadre académique simple [21].

III 3.4.1.Les règles floues :

Cette méthode a été formalisée par Lotfi Zadeh en 1965 et représente une alternative efficace pour le contrôle de systèmes complexes et non linéaires, car elle permet l'utilisation d'heuristiques intuitives pour obtenir un contrôle simple, fiable et robuste. Dans la logique floue, les variables sont caractérisées par des termes linguistiques flous, tels que « faible », « moyen » et « fort », et des fonctions d'appartenance sont attribuées à ces termes. Les degrés d'appartenance des variables peuvent prendre n'importe quelle valeur entre 0 et 1, ce qui permet d'éviter les situations binaires et de prendre en compte la nuance. Les règles de la logique floue entraînent des décisions distinctes qui sont pondérées en utilisant les degrés de satisfaction calculés pour chaque règle [18].

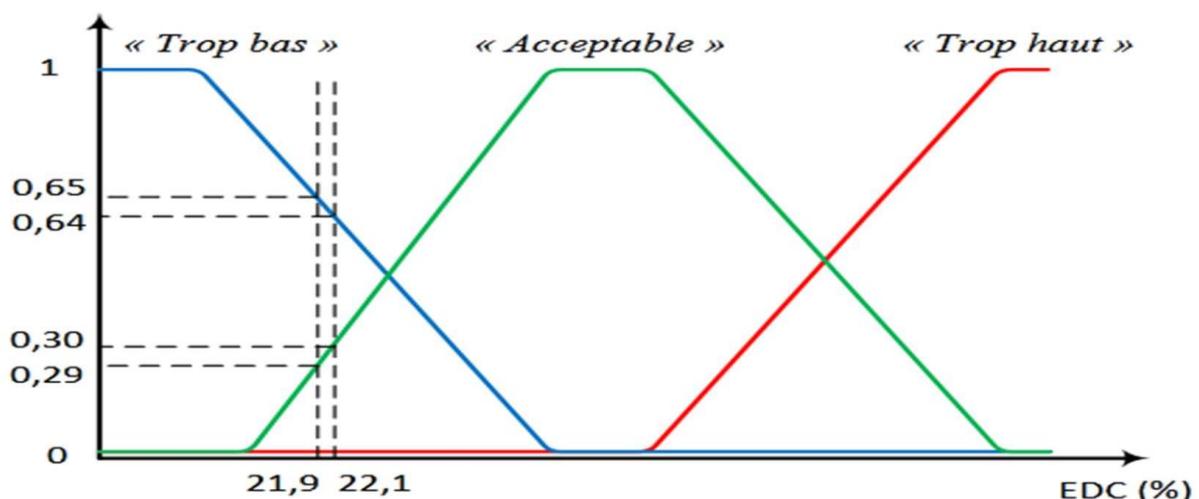


Figure .III 2 : Fonctions et degrés d'appartenance de la logique floue

Les stratégies de contrôle basées sur la logique floue ont montré des performances supérieures aux méthodes déterministes en matière de consommation d'énergie et d'émissions. Les études comparatives ont montré des réductions significatives de la consommation d'énergie, allant jusqu'à 46%, selon le cycle de vitesse considéré. La logique floue est considérée comme un outil de contrôle robuste, adapté à une grande variété de cycles de vitesse et de conditions de trafic incertaines. Cependant, l'implémentation des règles floues nécessite un certain niveau d'expertise de la part du concepteur, ce qui peut limiter son utilisation. Des hypothèses fortes doivent être faites en fonction des connaissances du concepteur sur le problème, ce qui peut être un inconvénient [22].

III .3.4.2.Les règles à base des réseaux neurones :

Les modèles de réseaux neuronaux sont des outils informatiques conçus pour imiter les capacités cognitives humaines, telles que la mémorisation et le raisonnement. Des recherches ont été menées pour appliquer cette approche à la gestion de l'énergie, comme en témoignent certaines études de la littérature. Ates a élaboré un contrôleur de supervision basé sur un réseau neuronal, en utilisant la méthode de l'Adaptive Linear Neural Network (ADALINE) pour déterminer la puissance fournie par un système de pile à combustible. Askarzadeh et Prokhorov ont également combiné ce type de réseau neuronal avec de la logique floue pour augmenter les possibilités de la méthode. Cependant, cette approche a l'inconvénient de nécessiter une grande base de données expérimentale pour la formation du processus de connaissance, ainsi qu'un manque de preuves de stabilité [22].

III.3.5 Machine Learning :

Le Machine Learning, qui est un sous-domaine de l'intelligence artificielle, est une discipline qui se concentre sur l'utilisation d'algorithmes informatiques pour permettre aux systèmes de réaliser des tâches intelligentes en s'adaptant à partir des observations de données et d'expériences antérieures. Cette méthode est largement utilisée dans des applications courantes telles que les recommandations la reconnaissance optique des caractères. En outre, elle peut être utilisée dans des domaines spécifiques tels que la gestion de l'énergie pour prolonger la durée de vie de la batterie des téléphones portables et la réduction de la consommation de carburant pour les véhicules hybrides.

III.4.Organigramme de gestion de puissance :

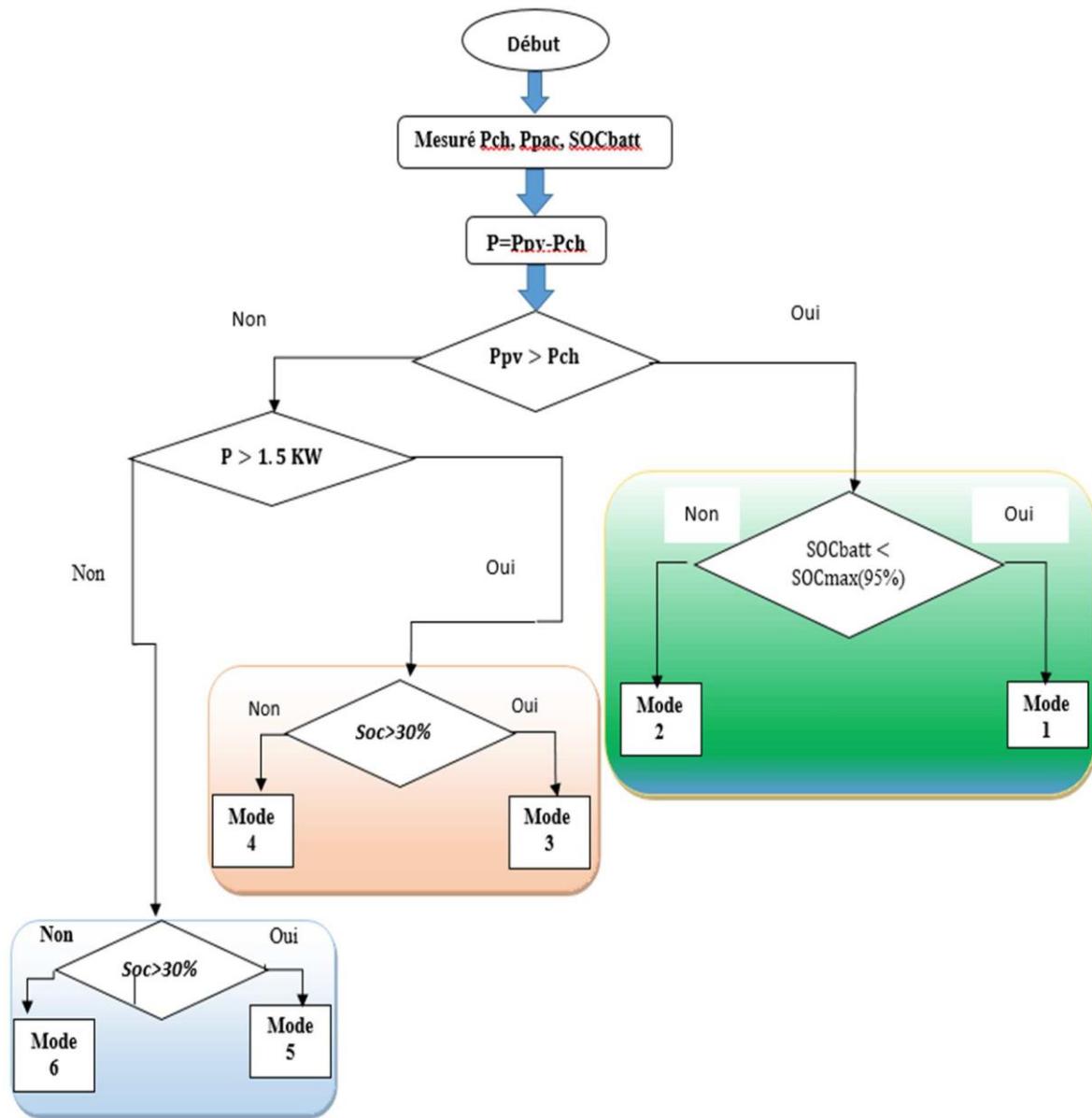


Figure .III 3: Organigramme de la stratégie de gestion de l'énergie

III.5. Différents scénarios pour la gestion d'énergie :

- **Mode 1:** L'énergie générée par le *GPV* est supérieure à la demande de charge ($P_{pv} > P_{ch}$), et les batteries n'ont pas chargées ($SOC_{batt} < SOC_{max}$). "M1", le surplus de la puissance produite par le GPV destinée à la charge les batteries.
- **Mode 2:** L'énergie générée par le *GPV* est supérieure à la demande de Charge ($P_{pv} > P_{ch}$), et les batteries sont complètement chargées ($SOC_{batt} \geq SOC_{max}$). "M2".

- **Mode 3 et 4 :** L'énergie générée par le *GPV* est inférieur à la puissance demandée ($P_{pv} < P_{ch}$) et elle dépasse 1.5 KW, dans ce mode nous avons fixé la puissance dissipée par les batteries à 1.5 KW comme un pic, l'hydrogène toujours > 0 la pile fonctionne avec les batteries et le GPV "M3", "M4" les batteries sont déchargées, le générateur photovoltaïque et la pile à combustible assurent le fonctionnement du système.
- **Mode 5 :** L'énergie générée par le GPV est toujours inférieur à la puissance demandée ($P_{pv} < P_{ch}$) avec ($P < 1500$ W), dans ce mode les batteries et le GPV assurent le fonctionnement du système (SOCbatt $>$ SOC min) "M5".
- **Mode 6 :** Les batteries sont déchargées (SOCbatt $<$ SOC min), le GPV et la pile à combustible assurent le fonctionnement du système "M6".

Avec :

$$Soc_{max} = 95\% \quad ; \quad Soc_{min} = 30\%$$

III.6. Conclusion

Nous avons établi également dans ce chapitre, une stratégie permettant de gérer les flots d'énergie dans un système hybride et étudier la gestion d'énergie dans tout le système avec les modes possible.

Avoir un dimensionnement optimal et une bonne stratégie de gestion d'énergie qui permet de concevoir des systèmes hybrides.

Chapitre IV

résultats de simulation

IV.1. Introduction :

Après avoir modélisé tous les éléments du système étudié au chapitre III. Dans ce chapitre, nous allons simuler avec le programme MATLAB le système global. La figure (IV.1) montre le système hybride global (photovoltaïque, pile à combustible avec stockage). Le système proposé est composé d'un générateur photovoltaïque (GPV) de 3.4kW et une pile à combustible de 6 kW et un système de stockage (batteries). Un convertisseur continu-continu est utilisé pour contrôler chacune des deux sources. Les convertisseurs DC-DC individuels , qui maintient la sortie de la tension.

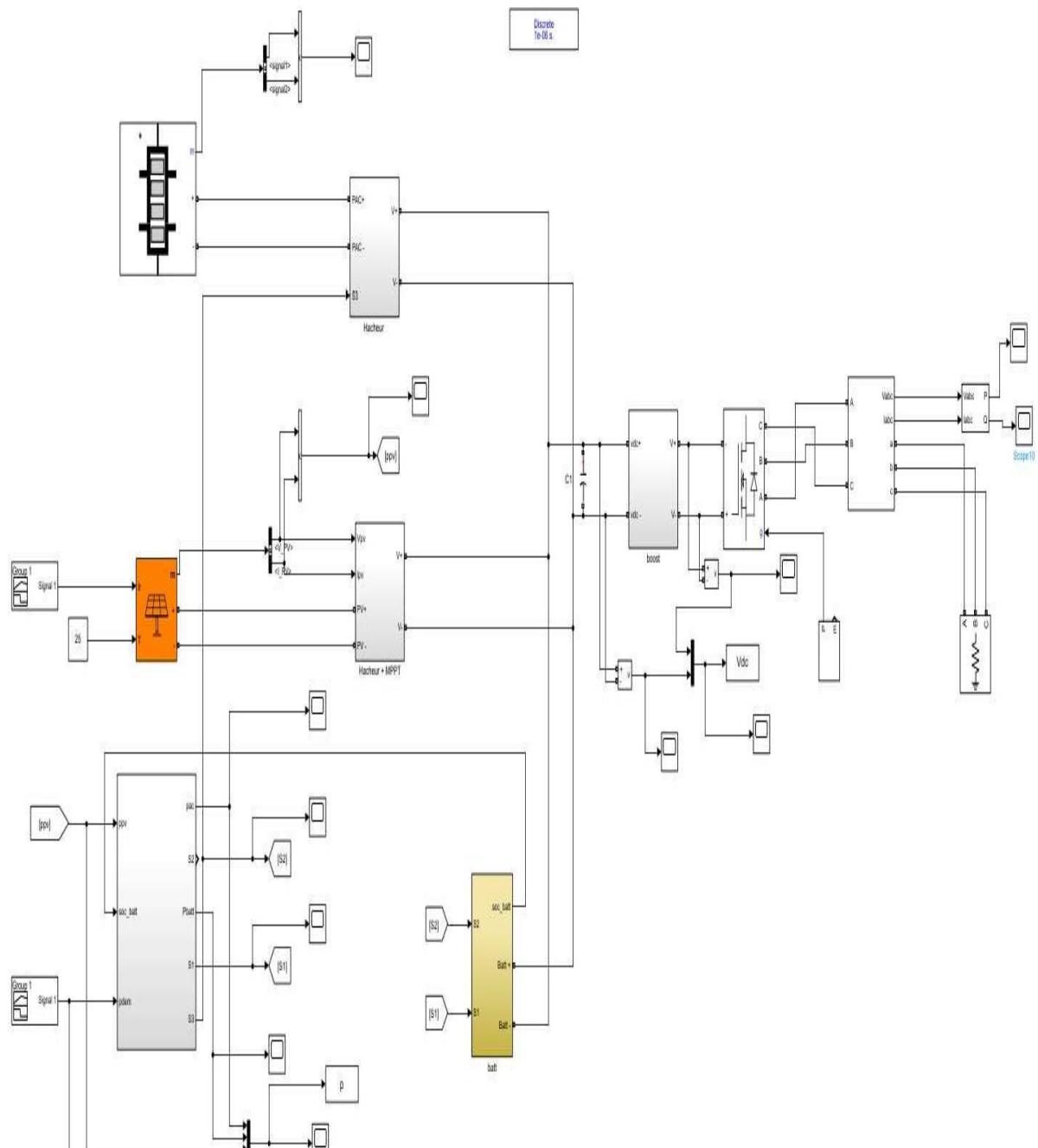


Figure . IV. 1:Schéma du système global.

IV.2. Générateur photovoltaïque:

Notre générateur est constitué de 16 modules PV, divisés comme suit : 2 modules connectés en parallèle et 8 modules connectés en série, chaque module est caractérisé par une tension, un courant et une puissance maximale, résumé dans le tableau (IV.1).

Tableau IV. 1: Caractéristiques électriques du module photovoltaïque.

Nombre de cellules	60 cellules monocristallines
$V_{co}(v)$	36.3 V
$I_{co}(A)$	7.84 A
$V_{mp}(V)$	29 V
$I_{mp}(A)$	7.35 A
$P(W)$	213.15 W

IV.2.1. Allure de l'éclairement (G) : Dans notre travail, nous allons supposer que la température constante à 25 °C et l'éclairement varie à long de la journée, La Figure (IV.2) montre la courbe de variation de l'éclairement durant une journée.

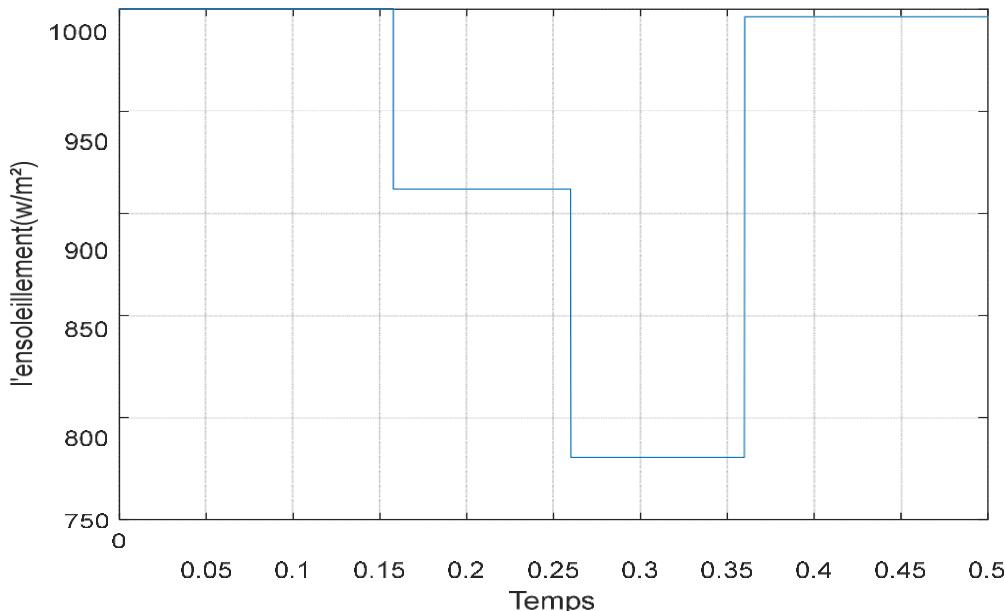


Figure . IV. 2:Allure de l'éclairement

Les figures (IV.3, IV .4, IV.5) montré les variations de courant et la puissance . , la tension , Les courbes suivent les changements du l'éclairement et convergent bien, et la puissance de GPV atteindre sa valeurs maximale sous les conditions idéal

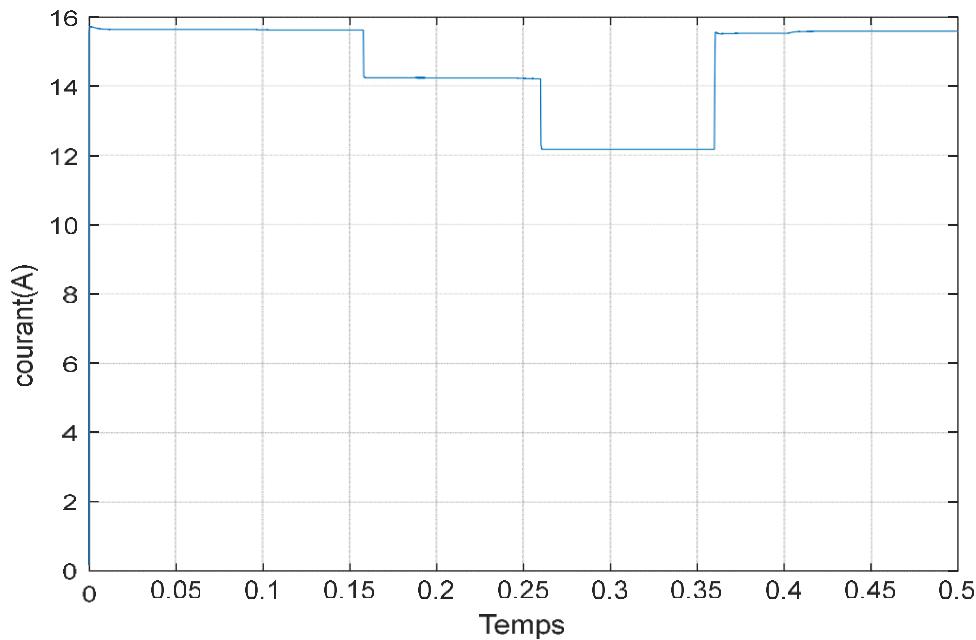


Figure . IV. 3:Variation du courant de GPV

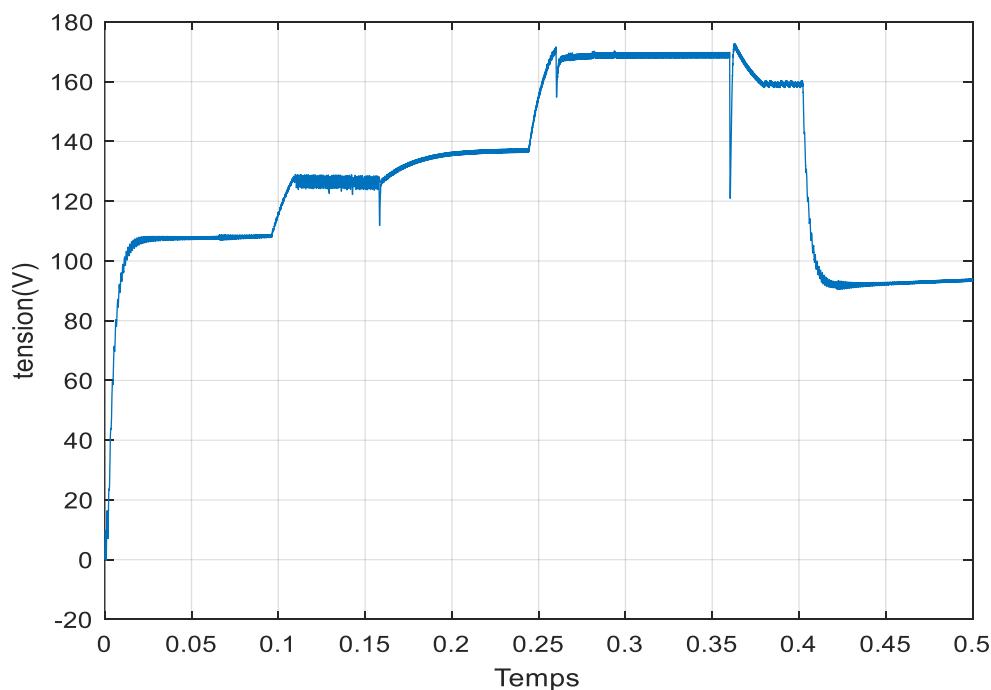


Figure . IV. 4:Variation de la tension de GPV

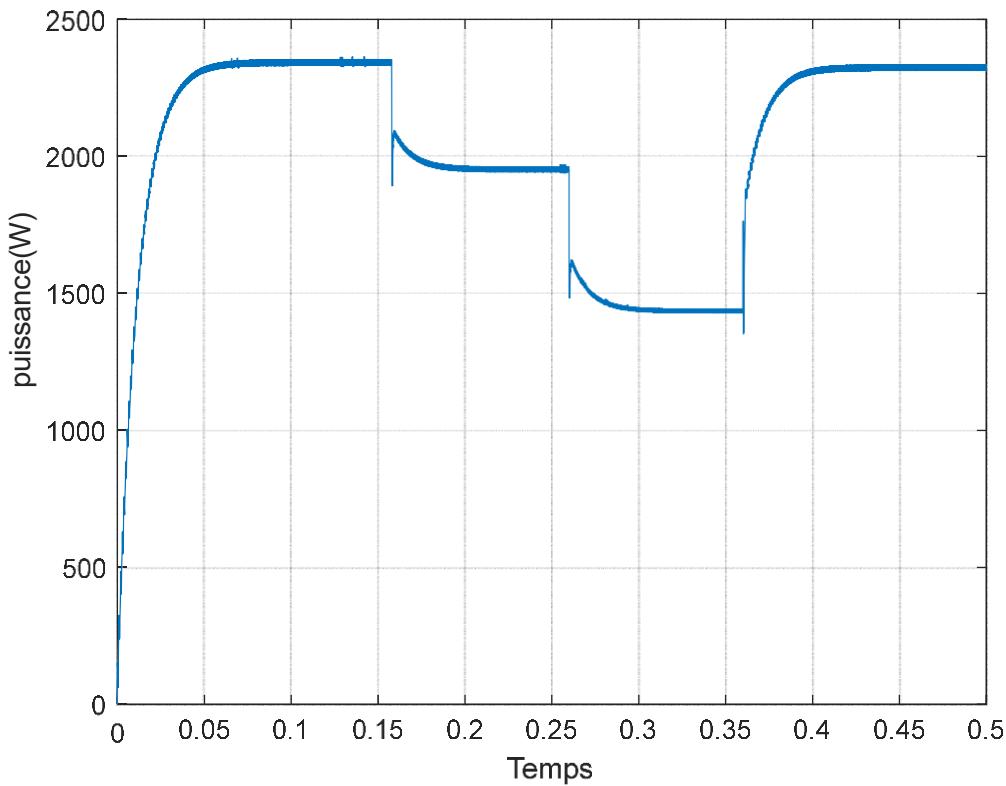


Figure . IV. 5:Variation de la puissance de GPV.

Le tableau (IV.2) représente les valeurs de à chaque point où l'éclairement change les valeurs

Tableau IV. 2: Les valeurs de I_{GPV} , V_{GPV} et P_{GPV}

Temps de simulation	l'éclairement	I_{GPV} (A)	V_{GPV} (V)	P_{GPV} (w)
[0 – 0.16]	1000 W / m^2	15.75	155	2450
[0.16 – 0.26]	920 W / m^2	14	135	1890
[0.26 – 0.36]	775 W / m^2	12	115	1380
[0.36 – 0.5]	990 W / m^2	15.60	150	2340

IV .2.2 Convertisseur élévateur (Boost) de GPV : La figure (IV.6) représenté le schéma électrique de Convertisseur élévateur (Boost) de GPV.

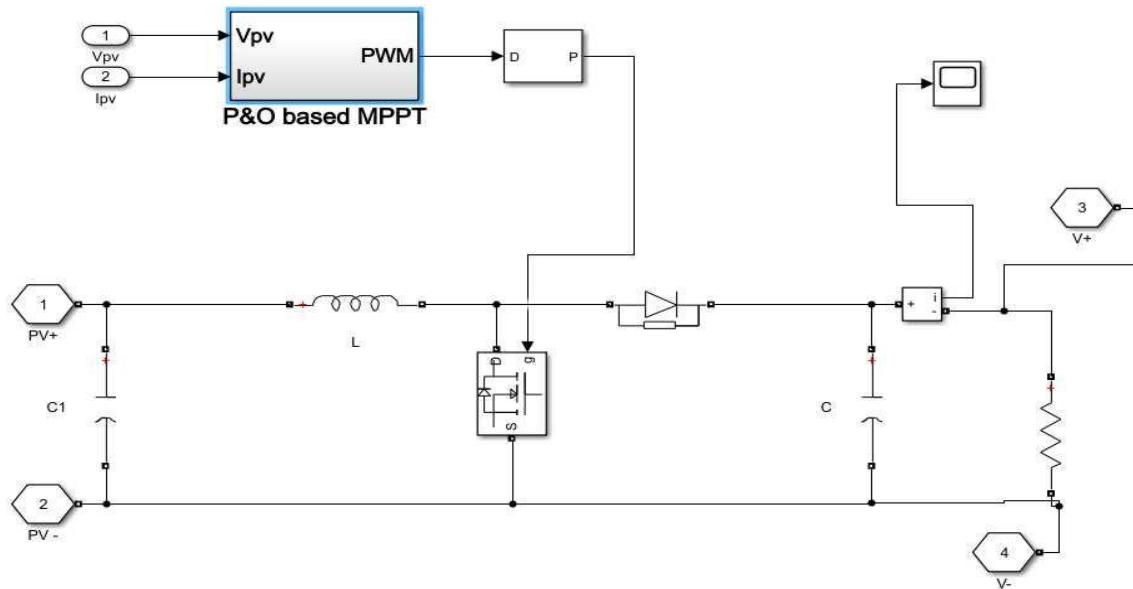


Figure . IV. 6: Convertisseur (Boost) de GPV.

Grace à cette méthode perturbations et observations(P&O) basé sur MPPT(maximum power point tracker), les 2 allures de tension entrée ($v_{in\ boost}$) et la tension de sortie($v_{out\ boost}$) de convertisseur Boost sont présentés sur la figure (IV.7).

La figure .IV.7: montre l'évolution de la tension continue Vdc de GPV en fonction du temps, à la fois avant et après Bloc de conversion boost.

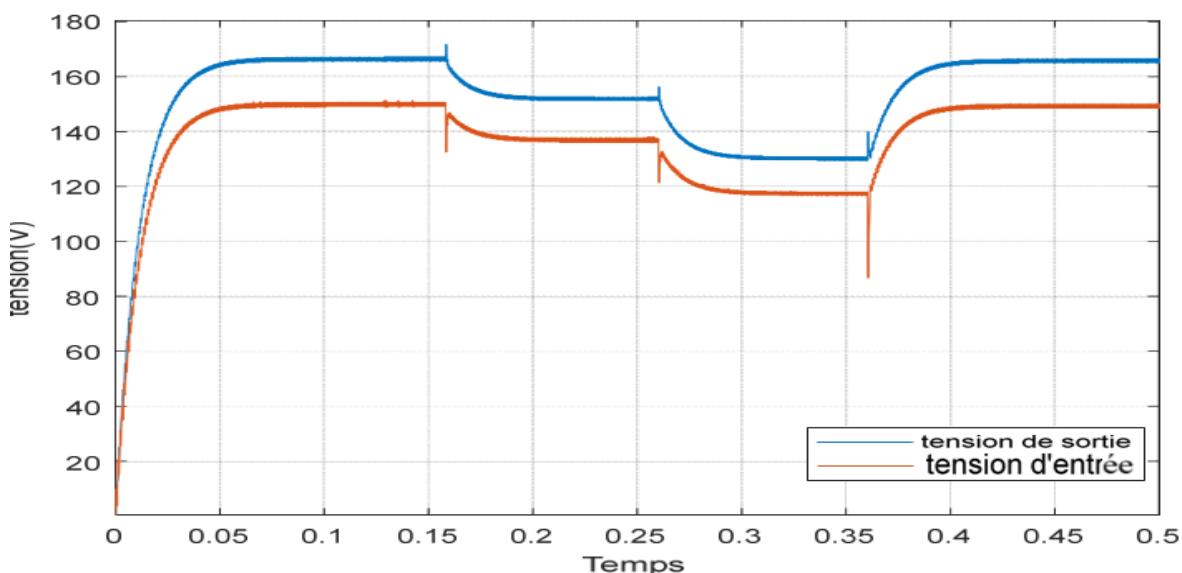


Figure . IV. 7: Variation de la tension du GPV à la sortie du convertisseur (Boost).

IV.3. batterie :

Tableau IV. 3: Paramètres de la batterie

Batterie	La tension nominale (V)	Capacité (Ah)	Résistance interne (Ω)	Courant nominal de décharge (A)
	100	1440	2.5	0.17391

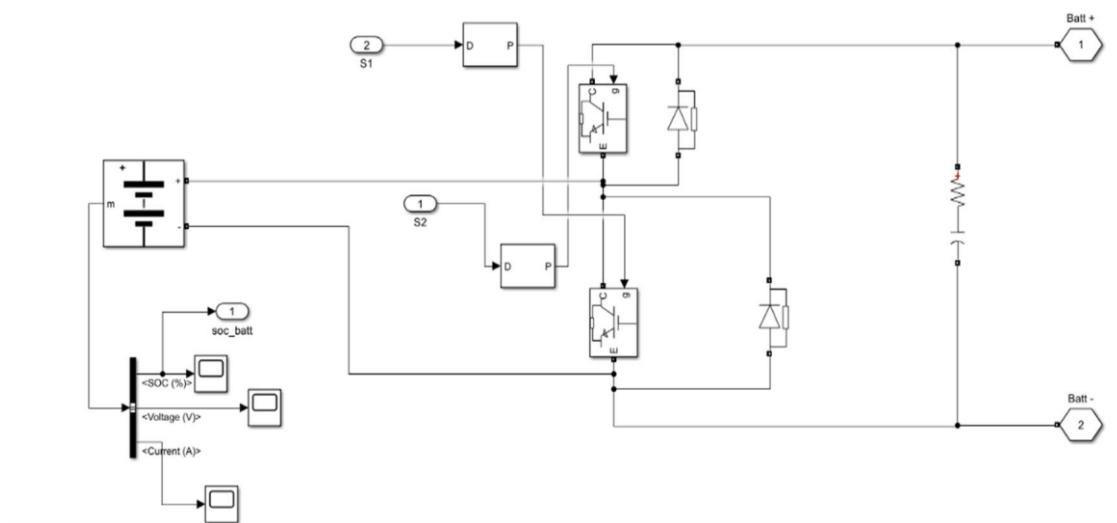


Figure . IV. 8: Système de batterie sous Matlab Simulink

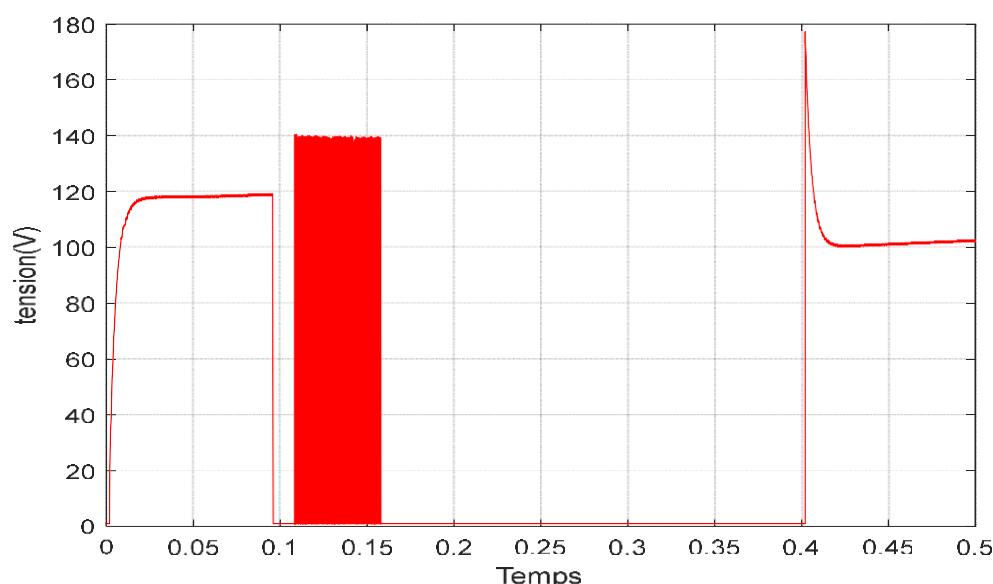


Figure . IV. 9: Variation de la tension de la batterie

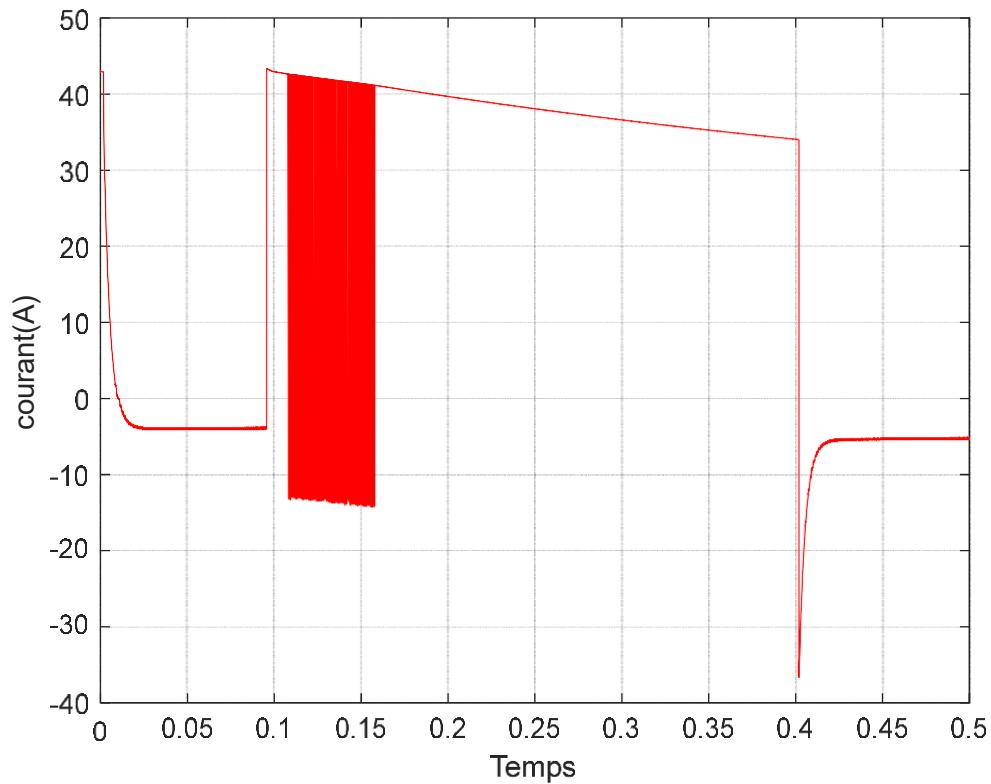


Figure . IV. 10: Variation du courant de la batterie

la figure IV.11. montre l'état de charge et de décharge de la batterie en fonction du temps du système

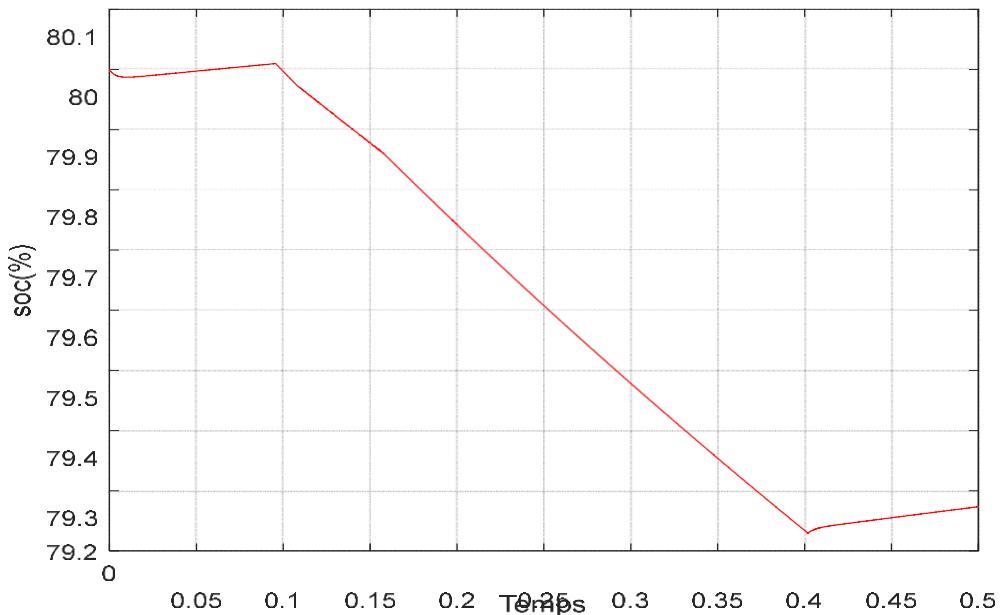


Figure . IV. 11: Soc de la batterie

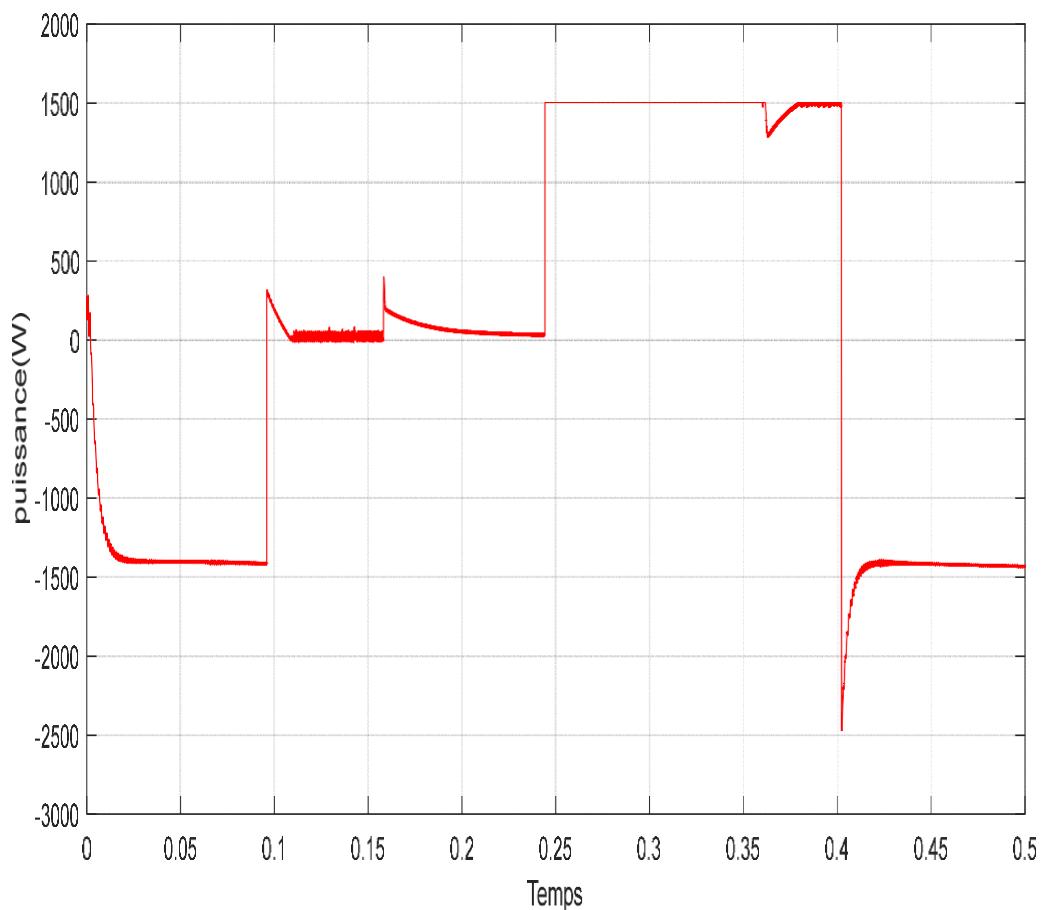


Figure . IV. 12:Variation de la puissance de la batterie

IV .4.Pile à combustible :

Tableau IV. 4: Paramètres de la pile à combustible

Pile à Combustible	Type de la pile	Udc(v)	Le courant maximal (A)	La puissance maximal (KW)
	PEMFC	45	133.3	6

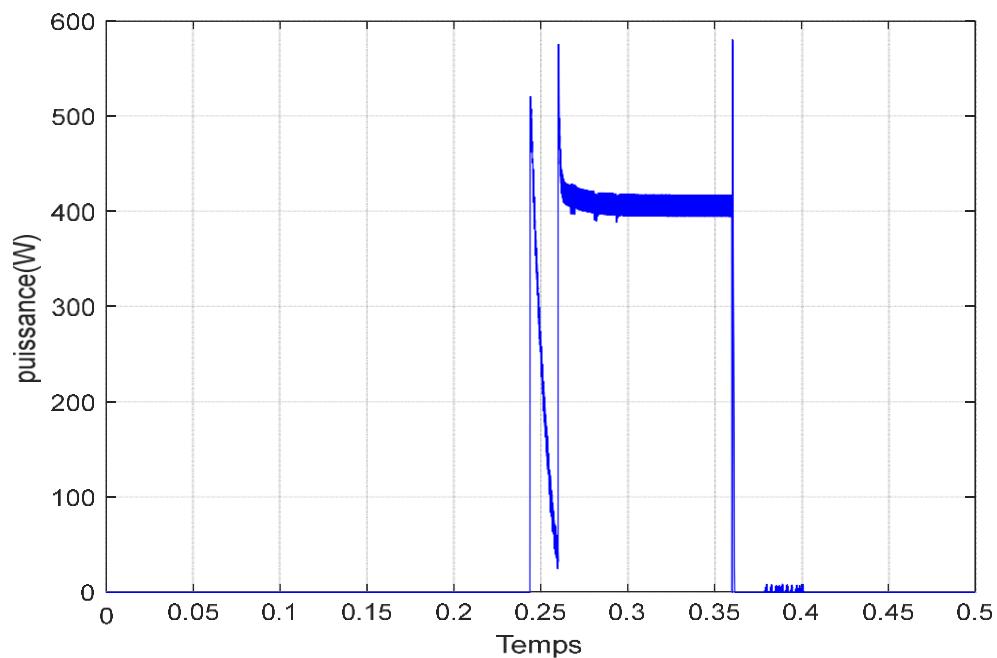


Figure . IV. 13:Variation de la puissance de la pile a combustible

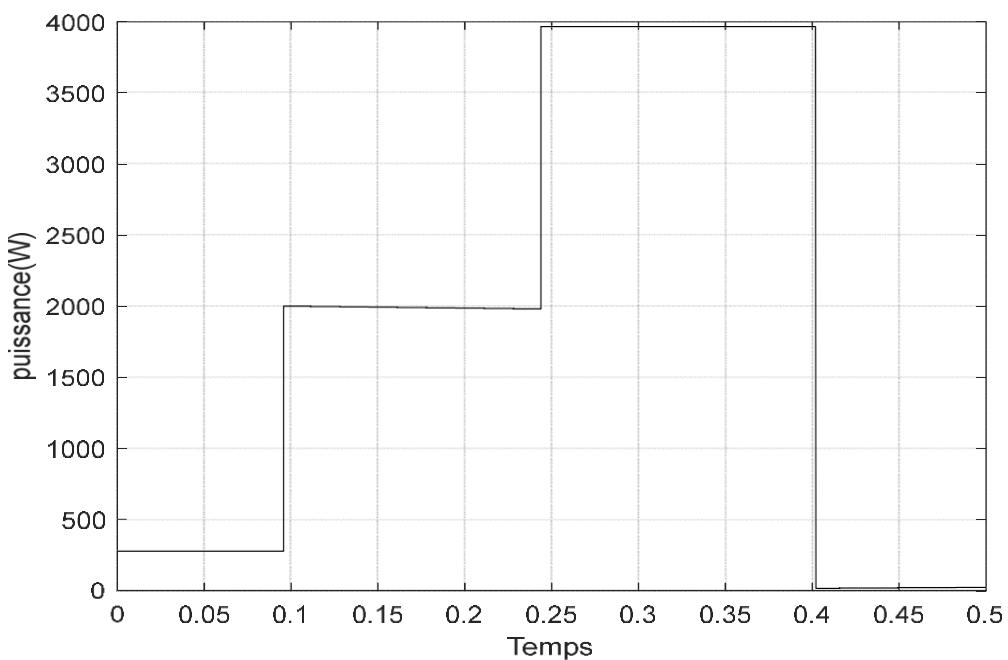


Figure . IV. 14:Variation de la puissance demandée

La figure IV.16 montre la variation de la puissance globale du système hybride en fonction du temps. On remarque plusieurs paliers correspondant aux différents régimes de fonctionnement des sources d'énergie.

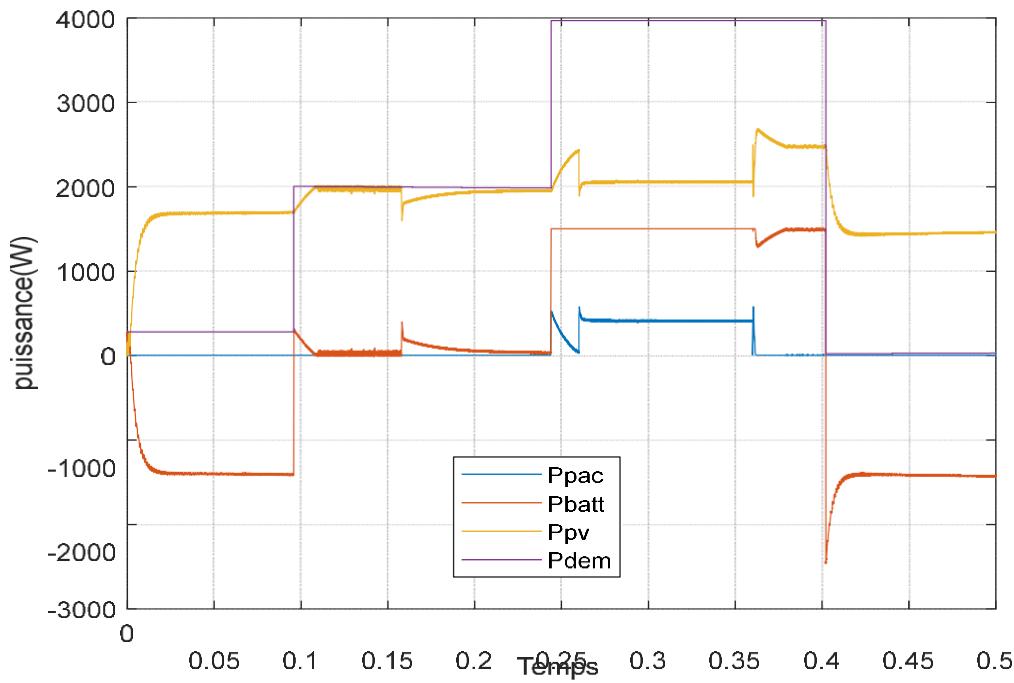


Figure . IV. 15:Variation de la puissance globale du système

La figure.IV.17 : montre l'évolution de la tension continue Vdc en fonction du temps du système .

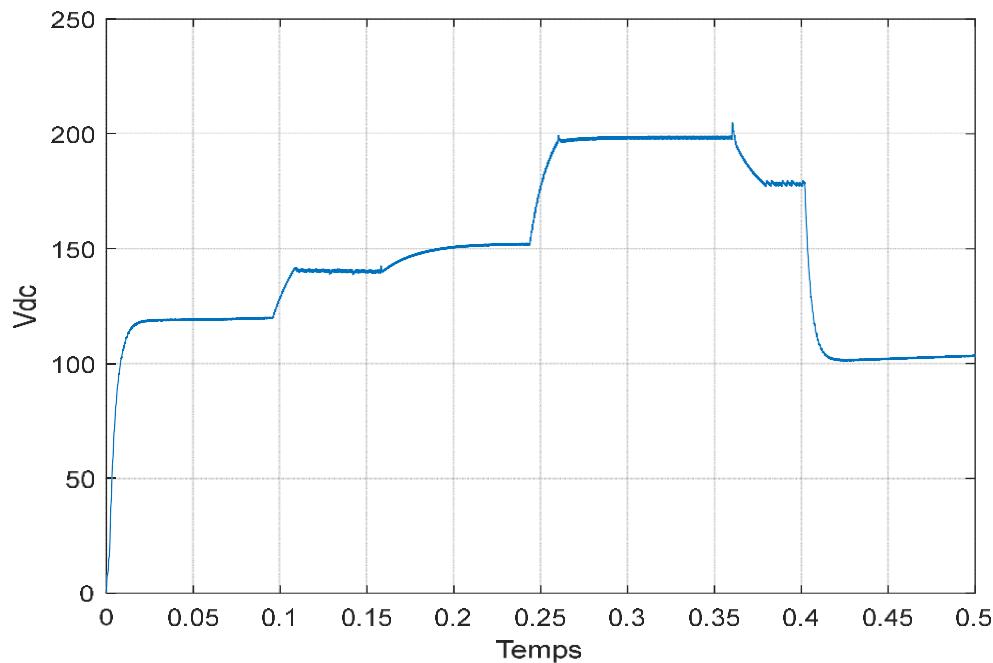


Figure . IV. 16:Variation de la tension Vdc du système

La figure IV.18: montre l'évolution de la tension continue Vdc en fonction du temps, à la fois avant et après l'étage de conversion boost. On observe que la tension Vdc avant le boost (courbe rouge) varie entre environ 100 V et 180 V, suivant les variations de la source en entrée. Après le passage par le convertisseur boost (courbe bleue), la tension est nettement augmentée, atteignant une valeur stable autour de 400 V.

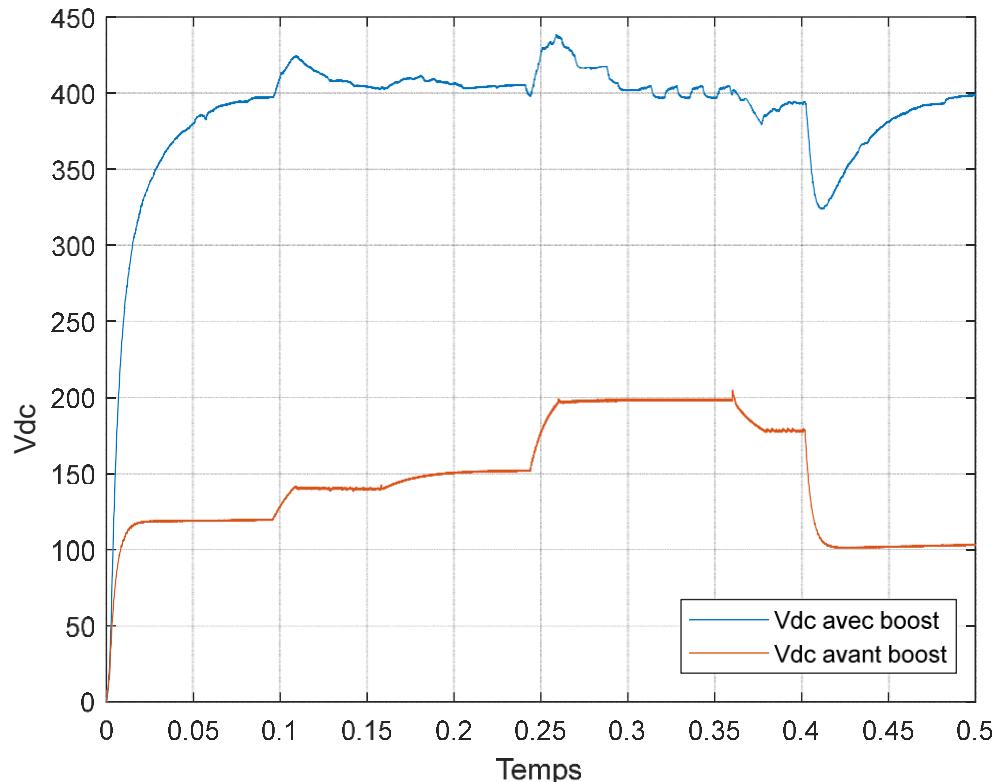


Figure . IV. 17: tension du Vdc avec boost

IV .5.Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons simulé l'ensemble des composants constituant le système hybride photovoltaïque / pile à combustible, notamment le générateur photovoltaïque (GPV), la pile à combustible (Pac), le hacheur élévateur, ainsi que le système de stockage par batterie. Les résultats obtenus nous ont permis de proposer différentes recommandations visant à assurer le bon fonctionnement du système et à optimiser l'utilisation de l'énergie produite par les différentes sources.

Conclusion générale

Conclusion Générale :

Dans ce travail, nous avons étudié un système hybride combinant des panneaux photovoltaïques, une pile à hydrogène (PEMFC) et un système de stockage par batteries. L'objectif principal était de gérer efficacement la répartition de la puissance entre ces différentes sources pour garantir une alimentation électrique continue, stable et adaptée à la demande.

La modélisation et la simulation du système ont été réalisées sous MATLAB/Simulink, ce qui nous a permis d'analyser le comportement dynamique du système dans différentes conditions. Les résultats obtenus montrent que la gestion de puissance proposée permet d'exploiter au mieux chaque source d'énergie : l'énergie solaire est utilisée en priorité, la batterie intervient en cas de besoin rapide, et la pile à hydrogène prend le relais quand l'ensoleillement est faible ou insuffisant.

Ce projet nous a permis de mieux comprendre le fonctionnement d'un système hybride et l'importance d'un bon pilotage énergétique. Il ouvre également la voie à plusieurs améliorations futures, comme l'ajout d'autres sources d'énergie, ou l'optimisation des algorithmes de gestion pour encore plus d'efficacité.

En guise de perspectives nous proposons de :

- Utiliser des commandes MPPT intelligentes au système photovoltaïque.
- Faire une étude technico-commercial de l'installation.

Références bibliographique

[1] L.Stoyaov<<Etude de différentes structures de systèmes hybrides a sources d'énergie renouvelable>>thèse de doctorat en génie électrique de l'université Technique de sofia, 2011

[2] I. VECIU thèse présentée pour obtenir le grade de docteur de l'université du havre “modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome“ année 2005

[3] Lal, S., Raturi, A., & Gounder, N. (2017). *Design of a 100% renewable energy system for a rural community: A case study of Koro Island, Fiji*. Renewable Energy, 108, 653–664.

[4] IRENA (Agence internationale pour les énergies renouvelables). *Perspectives mondiales des énergies renouvelables : Édition 2023*.

[5] BENHADDADI, « Optimisation d'un système hybride (éolien – photovoltaïque) totalement autonome », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 9, N°3 199 – 209, 2006

[6] Belhadj, J., & Ben Ahmed, H. (2012). *Étude et modélisation d'un système hybride solaire-hydroélectrique pour les zones isolées*. Revue des Energies Renouvelables, Vol. 15, N°1, pp. 37–44.

[7] D. REKIOUA, Z. ROUMILA et T. REKIOUA, « Etude d'une centrale hybride photovoltaïque - éolien – diesel », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 11 N°4 623 – 633, 2008

[8] K. Farah ,C. Nesrine ,<< Commande d'un générateur photovoltaïque débitant sur une pompe (MPPT)>> ,2014.

[9] << optimisation d'un systeme d'énergie photovoltaïque application au pompage>>, thèse de magister, 28 / 1 1 / 2007.

[10] Larminie, J. et Dicks, A. (2003). *Les systèmes à pile à combustible expliqués* (2e éd.). Wiley

[11] J. RAMOUSE, (TRANSFERT COUPLE MASSE-CHARGE-CHALEUR DANS UNE CELLULE DE PILE A COMBUSTIBLE A MEMBRANE POLYMERÉE) THESE DOCTORAT, 21 NOVEMBRE 2005, L'INSTITUE NATIONALE POLYTECHNIQUE DE LORRAINE/FRANCE

[12] M. Belatel , F.Z. Aissous et F. Ferhat Contribution à l'étude d'une pile à combustible de type PEMFC utilisée pour la production d'énergie électrique verte Revue des Energies Renouvelables Vol. 15 N°1 (2012) 13 – 28 13

[13] : Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°3 (2008) 473 – 483

[14] : « Contribution à l'Etude d'Electro-générateurs à Pile à Combustible Conceptions d'Architectures et de Leurs Commandes » décembre 2010

[15] : A. NEFFATI THÈSE En vue de l'obtention du DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE Délivré par : Université de Toulouse III Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier) "Stratégies de gestion de l'énergie électrique d'un système multi-source : décision floue optimisée pour véhicule électrique hybride" avril 2013

[16] R. Mosdale, "Véhicules électriques à pile à combustible," Techniques de l'Ingénieur, no. D 5570,2003

[17] : " les Piles Basse Température PEMFC," CLEFS CEA-N°44, 2000-2001.

[18] 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, Laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique Industrielle, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2004

[19] : D. Candusso, Contribution à l'expérimentation de générateurs à piles à combustible de type PEM pour les systèmes de transport, HDR, l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, pp. 47, 2013.

[20] : J. Bernard, "Véhicules hybrides à pile à combustible : dimensionnement et stratégies de commande," Thèse de doctorat, Université de valenciennes et du Hainaut Cambrésis, " 3 décembre 2007

[21] : T. MESBAHI Influence des stratégies de gestion d'une source hybride de véhicule électrique sur son dimensionnement et sa durée de vie par intégration d'un modèle multi physique CENTRALE LILLE 25/03/2016

[22] : N. Romani, 'Modélisation et commande du système d'Alimentation en Air pour le Module de puissance d'un véhicule à pile à combustible avec Reformage Embarqué, université Paris Sud-Paris XI,2007.

Résumé :

Ce mémoire s'inscrit dans le contexte de la transition énergétique et de la nécessité d'assurer une alimentation électrique fiable à partir de sources renouvelables intermittentes. Il traite spécifiquement de la **gestion de puissance dans un système hybride** associant des panneaux photovoltaïques, une pile à combustible de type PEM (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) et un système de stockage par batteries.

L'objectif principal du travail est de développer et de valider une stratégie de gestion énergétique capable de répartir intelligemment la puissance entre ces différentes sources, afin de garantir une alimentation continue, stable et adaptée à la demande. Pour cela, une **modélisation dynamique complète** du système a été réalisée sous **MATLAB/Simulink**, incluant le générateur photovoltaïque, la pile à combustible, les convertisseurs DC-DC et le système de stockage.

Plusieurs scénarios de fonctionnement ont été étudiés afin d'illustrer la réactivité et la complémentarité des sources. Les résultats de simulation montrent que la stratégie proposée exploite efficacement les caractéristiques de chaque source : l'énergie solaire est utilisée en priorité, la batterie assure la compensation rapide lors des fluctuations, et la pile à hydrogène intervient en soutien lorsque l'ensoleillement est faible ou insuffisant.

Les conclusions mettent en évidence l'importance d'un **pilotage énergétique optimisé** pour améliorer la fiabilité et la durabilité des systèmes hybrides. Le travail ouvre également des perspectives intéressantes, notamment l'intégration de commandes MPPT intelligentes pour le photovoltaïque et l'étude technico-économique d'une telle installation.

En définitive, ce projet a permis de démontrer que les systèmes hybrides avec stockage constituent une solution prometteuse pour répondre aux enjeux actuels d'autonomie et de durabilité énergétiques, tout en offrant une flexibilité d'exploitation adaptée aux besoins réels.