

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A/Mira - Bejaia

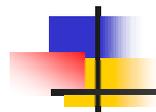


Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique



Mémoire de fin d'étude
En vue de l'obtention du diplôme Master
en énergie renouvelable

Spécialité : *Energie Renouvelable en Electrotechnique*

 **Thème**

Gestion d'énergie d'une station multi
sources dédiée au chargement des
véhicules hybrides

Réalisé par :

Mr : MEBARKI Azzeddine

Mr : MEBARKI Tarek

Encadré par :

Mr : DJERMOUNI. K

Mr : BERBOUCHA. A

Promotion 2017-2018

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions DIEU le tout puissant de nous avoir donné le Courage et la patience durant toutes ces années d'études, et que grâce à lui ce Travail a pu être réalisé.

On tient à remercier vivement les membres de nos familles qui nous ont toujours encouragée et soutenue.

Ensuite, nous voulons exprimer notre reconnaissance à notre promoteur Mr. DJERMOUNI. K pour son encadrement efficace, son soutien et son disponibilité. Qu'il trouve ici l'expression de notre profonde gratitude.

Nous remercierons notre Co-promoteur Mr BERBOUCHA pour son aide précieuse, ses conseils et pour le temps qu'il nous a consacré tout au long de ce travail.

Nous tenons à remercier Mr MEBARKI.N, pour l'aide qu'il nous a apporté aussi bien sur le plan moral que travail.

Nous tenons aussi à remercier les membres du jury d'avoir accepté de juger notre travail.

En fin un grand Merci à toutes personnes ayant contribués de près ou de loin à l'accomplissement de ce modeste travail.



Azzeddine et Tarek.

Dédicaces

Avec ma profonde gratitude et grand amour, je dédie ce
modeste travail :

A ceux que j'ai tant aimé et respecté, qui pendant mon
enfance, m'ont entouré de leurs affections, leurs
patience et amours grâce à eux que je suis aujourd'hui
ici, vous mes chers parents.

A mes très chères frères et sœurs.

A toute ma famille.

A tous mes amis.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail reflétant mon effort consenti

durant le cursus universitaire à :

A ma chère mère qui est pour mon corps mieux qu'un cœur ;

A mon cher père qui a sacrifié son temps pour nous ;

A mon frère BILEL, et à ma sœur NOURA ;

A toute ma grande famille MEBARKI, ainsi que la famille

AMRANE ;

A mes copains de chambre ;

A mes collègues des études ;

Et à tous mes amis sans exception.

Tarek

Table des matières

Table des matières

Introduction générale	1
------------------------------------	---

Chapitre I : Généralités

I.1 Introduction	3
I.2 Généralités sur les systèmes électriques hybrides SEH.....	3
I.2.1 Configuration du bus dans les systèmes hybrides	4
I.2.1.1 Architecture à bus continu CC	4
I.2.1.2 Architecture à bus alternatif AC	5
I.2.2 Avantages et inconvénients d'un système hybride	6
I.2.2.1 Avantages	6
I.2.2.2 Inconvénients	6
I.3 Généralités sur les systèmes photovoltaïques.....	7
I.3.1 Historique	7
I.3.2 Chronologies.....	8
I.3.3 Energie solaire	8
I.3.4 Cellule photovoltaïque	9
I.3.4.1 Définition.....	9
I.3.4.2 La conversion photovoltaïque.....	10
I.3.4.3 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque	10
I.3.4.4 Matériaux utilisés dans les cellules PV	12
I.3.4.5 Caractéristique courant-tension et puissance-tension.....	12
I.3.4.6 Groupement des cellules photovoltaïques	13
I.3.5 Module photovoltaïque	14

Table des matières

I.3.5.1	Caractéristiques d'un module	15
I.3.6	Panneau photovoltaïque.....	15
I.3.7	Champ photovoltaïque.....	16
I.3.8	Avantages et inconvénients	16
I.3.8.1	Avantages	16
I.3.8.2	Inconvénients	17
I.4	Convertisseurs statiques.....	17
I.4.1	Convertisseur DC/DC (hacheur).....	17
I.4.2	Convertisseur DC/AC (onduleur).....	18
I.4.3	Convertisseur AC/DC (Redresseur)	18
I.5	Pile à combustible	18
I.5.1	Pile à combustible : Historique et applications	18
I.5.2	Définition	19
I.5.3	Différents types de piles à combustible.....	20
I.5.4	Choix technologique de la pile à combustible	21
I.5.5	Principe de fonctionnement	22
I.5.6	Description de la cellule	23
I.5.6.1	Plaques bipolaires	23
I.5.6.2	Couches diffusion	24
I.5.6.3	Electrodes (anode et cathode)	24
I.5.6.4	Electrolyte	24
I.5.7	Applications des piles à combustibles	24
I.5.8	Avantages est inconvénients des piles à combustible de type PEM	26
I.5.8.1	Avantages.....	26

Table des matières

I.5.8.2 Inconvénients	26
I.6 Batteries	27
I.6.1 Présentation des accumulateurs	27
I.6.2 Principe de fonctionnement des accumulateurs	27
I.6.3 Quelques notions concernant l'accumulateur.....	29
I.6.3.1 Relation entre les noms « accumulateur », « cellule » et « batterie »	29
I.6.3.2 Plage de tension	29
I.6.3.3 Capacité.....	29
I.6.3.4 Rendement faradique	30
I.6.3.5 Etat de charge (SOC) et profondeur de décharge (DOD).....	30
I.6.3.6 Tension à vide (OCV).....	31
I.6.3.7 Tension nominale.....	31
I.6.3.8 Autodécharge	32
I.6.3.9 Durée de vie	32
I.7 Conclusion	32

Chapitre II Modélisation et simulation des sources d'énergie

II.1 Modélisation d'un générateur photovoltaïque.....	34
II.2 Introduction	34
II.3 Modèle à deux diodes	34
II.4. Simulation et interprétation des courbes	37
II.4.1 Programmation sous Matlab.....	37
a) Description de la méthode	37
b) Réalisation de L'organigramme de la méthode.....	38

Table des matières

II.4.2 Matlab/simulink.....	38
II.4.3 Résultats et interprétation des courbes	39
a) Influence de l'ensoleillement	39
b) Influence de la température	40
II.4.4 Conclusion	42
II.5 Optimisation de point de puissance maximale	42
II.5.1 Synthèse des différentes techniques de maximisation de la puissance	42
II.5.2 Description de la méthode	42
II.6 Modèle d'un hacheur survolteur (Boost).....	45
II.7 Modélisation D'une pile à combustible type PEMFC	47
II.7.1 Introduction	47
II.7.2 Modèle électrochimique de la pile à combustible PEMFC.....	47
II.7.2.1 Perte d'activation	48
II.7.2.2 Perte ohmique.....	50
II.7.2.3 Perte de concentration	51
II.7.3 Résultats de simulation	51
II.8 Modélisation de la batterie	52
II.8.1 Modèle de la capacité	52
II.8.2 Equations de la tension de décharge.....	53
II.8.3 Equations de la tension de charge	53
II.9 Conclusion	54
 Chapitre III Dimensionnement et gestion d'énergie de la station	
III.1 Introduction	55
III.2 Démarche globale de dimensionnement	55
III.3 Description de la station.....	55

Table des matières

III.4 Dimensionnement de la charge	56
III.5 Dimensionnement des sources d'énergies	59
III.5.1 Dimensionnement des générateurs photovoltaïque	59
a) Détermination de la taille de générateur photovoltaïque	60
b) Détermination de la surface totale à installée par les panneaux photovoltaïque	60
III.5.2 Dimensionnement des batteries de stockage	61
III.5.3 Dimensionnement de la pile à combustible type PEMFC	63
III.6 Description du gestionnaire d'énergie	64
III.7 Stratégie de fonctionnement de système de gestion d'énergie	65
III.8 Conclusion.....	68
 Chapitre IV Simulation et interprétation des résultats	
IV.1 Introduction.....	69
IV.2 Simulation du système globale	69
IV.3 Résultats de simulation	70
IV.4 Synthèse sur le fonctionnement par phase du système globale étudié avec l'algorithme de gestion.....	75
IV.5 Conclusion	76
Conclusion générale	77

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Architecture des systèmes hybrides d'énergie	4
Figure I.2 : Configuration du système hybride à bus continu.....	5
Figure I.3 : configuration du système hybride à bus alternatif	6
Figure I.4 : Cellule solaire photovoltaïque.....	10
Figure I.5 : Représentation schématique d'une cellule solaire	11
Figure I.6 : Structure et diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque.....	11
Figure I.7 : Caractéristique $I=f(V)$ d'un panneau PV	13
Figure I.8 : Caractéristique résultantes d'un regroupement de N_s cellules en série	13
Figure I.9 : Caractéristique résultantes d'un regroupement de N_p cellules en parallèle	14
Figure I.10 : Module photovoltaïque.	14
Figure I.11 : Panneau photovoltaïque.	16
Figure I.12 : Expérience de sir W. Grove en 1839	19
Figure I.13 : Schéma de principe d'un assemblage de cellules élémentaires cathode/électrolyte/anode.....	20
Figure I.14 : Principe de fonctionnement.....	22
Figure I.15 : Assemblage d'une cellule élémentaire.....	23

Liste des figures

Figure I.16 : Principe de fonctionnement des accumulateurs	28
Figure I.17 : Courbe OCV(<i>SOC</i>) mesurée 1 h après décharge et après charge d'une batterie A123 à 25°C	31

Chapitre II

Figure II.1 : Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle à deux diodes	34
Figure II.2 : Schéma du modèle équivalent à deux diodes d'une cellule photovoltaïque	35
Figure II.3 : Organigramme de la méthode.....	38
Figure II.4 : Bloc simulink de GPV	39
Figure II.5 : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $I=f(V)$	40
Figure II.6 : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $P=f(V)$	40
Figure II.7 Influence de la température sur la caractéristique $I = f(V)$	41
Figure II.8 : Influence de la température sur la caractéristique $P = f(V)$	41
Figure II.9 : Caractéristique $P_{PV}(V_{PV})$ d'un panneau photovoltaïque	43
Figure II.10 : Organigramme de la méthode perturbation et observation	44
Figure II.11 : Divergence de la commande P&O lors de variations d'irradiation	45
Figure II.12 : Circuit électrique du convertisseur DC-DC.....	45
Figure II.13 : Schéma d'un hacheur survolteur à $t \in [0, \alpha. T]$	46
Figure II.14 : Schéma d'un hacheur survolteur à $t \in [\alpha. T, T]$	46
Figure II.15 : Courbe tension-courant typique d'une pile à combustible	49

Liste des figures

Figure II.16 : Caractéristique $V_{pac}(I_{pac})$ et $P_{pac}(I_{pac})$ à $T=25^{\circ}\text{C}$ 51

Figure. II.17 : schéma équivalent de la batterie CIEMAT 52

Chapitre III

Figure III.1 : Voiture électrique : Volkswagen Golf..... 57

Figure III.2 : Voiture hybride : Renault 58

Figure III.3 : Voiture hybride rechargeable : Toyota Prius 58

Figure III.4 : Fiche technique de panneau photovoltaïque utilisé PV 59

Figure III.5 : Structure de système hybride étudiée..... 65

Figure III.6 : Organigramme de gestion d'énergie 67

Chapitre IV

Figure IV.1 : Schéma globale de simulation..... 69

Figure IV.2 : Profile de charge..... 70

Figure IV.3 : Variation de l'ensoleillement 70

Figure IV.4 : Puissance délivrée par les panneaux photovoltaïque 71

Figure IV.5 : Etat de charge et décharge des batteries..... 71

Figure IV.6 : Puissance délivrée par les batteries 72

Figure IV.7 : Tension des batteries 72

Figure IV.8 : Puissance délivrée par la pile à combustible 73

Figure IV.9 : Tension de la pile à combustible (avant le convertisseur DC/DC)
..... 73

Figure IV.10 : Tension de bus continu 74

Liste des figures

Figure IV.11 : Profile des différentes puissances du système global 74

Figure IV.12 : Profile de toutes les puissances de système hybride 76

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Principales caractéristiques et propriétés des différentes piles	21
Tableau I.2 : Comparaison de la caractéristique technique des batteries	28
Tableau III.1 : Temps faut-il pour le chargement d'un véhicule	56
Tableau III.2 : Puissance totale estimée par la charge.....	57
Tableau III.3 : Caractéristique de modèle de la batterie utilisée	61

Nomenclature

Nomenclature

SEH : Systèmes électriques hybrides ;

PV : Photovoltaïque ;

P_{pv} : Puissance photovoltaïque ;

P_c : Puissance crête d'un panneau photovoltaïque ;

h : Constante de Planck ;

c : Vitesse de la lumière ;

λ : Longueur d'onde ;

I_s : Courant de saturation.

m : Facteurs d'idéalité ;

V_{Br} : Tension de rupture ;

α : Facteur de correction ;

n : Indice de la rupture d'avalanche ;

I_{ph} : Photo-courant produit ;

R_s : Résistance série ;

R_p : Résistance parallèle ;

T : Température absolue en Kelvin ;

q : Charge élémentaire constante ($1.602 \cdot 10^{-19}$ C) ;

K : Constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}$ J/k) ;

E_g : Bande d'énergie de la semi-conductrice énergie de gap ;

T_{ref} : Représentent la température sous conditions STC ;

N_s : Nombre de cellules connectées en série ;

N_p : Nombre de cellules connectées en parallèle ;

N_{pv,s} : Nombre des panneaux en série ;

N_{pv,p} : Nombre des panneaux en parallèle ;

N_{pv} : Nombre de panneau photovoltaïque ;

S_u : Surface unitaire d'un panneau photovoltaïque [m²] ;

PAC : Pile à combustible ;

AFC : Alkaline fuel cells en français piles alcalines ;

PEMFC : Piles à membrane échangeuse de protons ;

PAFC : Phosphoric acid fuel cells en français piles à acide phosphorique ;

Nomenclature

SOFC : Solide oxide fuel cells en français piles à électrolyte solide ;
DMFC : Direct-methanol fuel cell en français piles à méthanol direct ;
MCFC : Molten-carbonate fuel cell en français piles à carbonate fondu ;
E_{Nernst} : Tension instantanée de Nernst ;
EME : Electrodes membrane ;
V_{act} : Pertes d'activation ;
V_{ohm} : Pertes ohmiques ;
V_{conc} : Pertes de concentration ;
T : Température opératoire absolue de la pile (K) ;
C_{O₂}^{*} : Concentration de l'oxygène (mol/cm³) ;
P_{H₂}^{*} : Pressions partielles à l'interface de l'hydrogène (atm) ;
P_{O₂}^{*} : Pressions partielles à l'interface de l'oxygène (atm) ;
P_{cath} : Pression de l'oxygène à la cathode ;
P_{anode} : Pression de l'hydrogène à l'anode ;
X_{H₂O}^{sat} : Fraction molaire de saturation de l'eau ;
λ_{H₂O}/SO₃⁻ : Teneur de l'eau dans la membrane ;
R_C : Résistance équivalente de contact à la conduction des électrons ;
R_M : Résistance équivalente de la membrane à la conduction des protons ;
r_M : Résistance spécifique de la membrane ;
SSE : Système de stockage Electrique/Energie ;
SOC : State of charge (en français EDC : Etat de charge) ;
C_{batt} : Capacité des batteries [Ah] ;
E_{ch} : Puissance de charge [KW] ;
N_{jaut} : Nombre de jours d'autonomie [h] ;
V_{batt} : Tension de la batterie [V] ;
DOD : Depth of discharg (en français **P_D**: Profondeur de décharge [%]) ;
η_{batt} : Rendement de la batterie [%] ;
C_{batt,u} : Capacité unitaire de la batterie [Ah] ;
N_{batt,s} : Nombre de batterie on série ;
N_{batt,p} : Nombre de batterie parallèle ;
CC : Courant continu ;
CA : Courant alternatif.

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

Avec la croissance des problèmes environnementaux et le manque prévu des sources d'énergie pour les prochaines décennies, il est important de trouver d'autres formes d'énergie plus efficaces et propres, les réservations globales de pétrole sont seulement suffisantes pendant environ 40 ans [1].

Les sources d'énergie renouvelables (SER) font l'objet d'un regain d'intérêt ces dernières années. La cause principale de cet essor se cache derrière les pronostiques d'épuisement des ressources énergétiques conventionnelles de la Planète : fuel, gaz naturel, charbon et même uranium. Au contraire, les SER peuvent être considérées comme inépuisables à l'échelle humaine, puisqu'elles utilisent des flux énergétiques naturels issus (du soleil, de la biomasse ou de la géothermie). Une autre raison du développement des sources d'énergies renouvelables est la distribution non uniforme des ressources conventionnelles d'énergie sur la planète, couplée à une consommation non uniforme. Une dernière raison non négligeable est la lutte contre les émissions polluantes qui sont la cause de nombreux phénomènes néfastes comme l'effet de serre, le trou d'ozone stratosphérique, le réchauffement global etc.

Les besoins électriques peuvent être satisfaits grâce à une génération distribuée assurée par des systèmes à Energie Renouvelable (EnR).

Parmi les sources des énergies renouvelables, on cite l'énergie solaire, l'énergie éolienne et les piles à combustible. Ce sont celles qui ont le potentiel énergétique le plus important en Algérie. Elles sont des énergies durables non polluantes et économiquement viables.

Les Systèmes d'Energies Hybrides (SEH) sont généralement élaborés pour les systèmes stationnaires ou embarqués ayant des besoins ponctuels de puissance, l'association d'une source d'énergie (pile à combustible, panneaux photovoltaïques, batteries, etc.) avec une source de puissance (super condensateurs, volant d'inertie, etc.) permet de bénéficier de l'apport de chacune en les sollicitant suivant leurs caractéristiques et le profil de mission à satisfaire [2].

Le secteur des transports routiers est un des plus consommateur d'énergie et pollueur en termes d'émissions de gaz à effets de serre. Cette prise de conscience collective a entraîné des réglementations toujours plus strictes sur les émissions polluantes et la consommation des

Introduction générale

véhicules, qui sont ainsi devenues deux critères primordiaux pour la conception de nouveaux véhicules.

Les véhicules tout électriques ont été présentés comme une solution prometteuse, grâce à leurs indépendances vis-à-vis du pétrole. Mais leurs faibles autonomies ne leur permet pas aujourd'hui de remplacer définitivement les véhicules conventionnels, d'où le développement d'un autre concept : les véhicules hybrides [3].

C'est dans ce contexte, que vient d'inscrire notre travail, qui consiste à l'étude d'un système hybride à énergie renouvelable, qui constitué une station multi sources dédiées au chargement des véhicules tous électriques et hybrides, ainsi une stratégie de gestion d'énergie sera adoptée.

La station dont on souhaite la gestion d'énergie est constituée d'un système photovoltaïque avec stockage (batteries au plomb acide) et une pile à combustible (PEMFC).

Pour cela, notre travail sera structuré comme suit :

- Le premier chapitre présentera des généralités sur les systèmes d'énergies hybrides, et les énergies renouvelables ainsi les deux sources utilisées (PV, PAC) ;
- Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation et la simulation des composants de système hybride (PV, batteries et pile à combustible), dans le but d'analyser leurs comportement, face aux variations climatiques et celles de la charge ;
- Dans le troisième chapitre, on va dimensionner les générateurs, selon la puissance de charge demandée, et on adoptera une stratégie de gestion d'énergie ;
- Le dernier chapitre concernera la simulation, à l'aide de Matlab-simulink, et l'interprétation des résultats obtenus.

Chapitre I

**Généralités sur les systèmes
hybrides à énergie
renouvelable**

I.1. Introduction

Par définition, une source hybride dite multi-sources, est le résultat de la combinaison de deux ou plusieurs sources d'énergie. L'hybridation est un sujet de recherche important depuis les années 90. C'est dans ce contexte que vient s'inscrire notre étude.

Dans ce chapitre, nous allons présenter brièvement les différents constituants du système étudié, notamment les différentes configurations que peuvent prendre les sources d'énergies d'un système électrique hybride. Puis nous présenterons les différentes sources utilisées, à savoir le générateur photovoltaïque, la pile à combustible, ainsi que les batteries de stockage dans le but de la gestion d'énergie pour le chargement des véhicules électriques.

I.2. Généralités sur les systèmes électriques hybrides SEH

Un système hybride à sources d'énergie renouvelables (SHSER) est un système électrique, comprenant plus d'une source d'énergie, (renouvelables et classiques). Les sources d'énergies renouvelables, comme le photovoltaïque et l'éolien ne délivrent pas une puissance constante, mais vu leurs complémentarités, leur association permet d'obtenir une production électrique continue. Les systèmes d'énergies hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées [4].

Le but d'un système d'énergie hybride est de produire le maximum d'énergie à partir des sources d'énergie 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.

Les sources d'énergies renouvelables peuvent être connectées au bus continu ou alternatif en fonction de la dimension du système, toutes ces composantes peuvent être connectées en différentes architectures, celles-ci sont résumées dans la figure (I.1). Dans la plupart des cas, les systèmes hybrides contiennent deux bus : un bus à CC pour les sources, les charges à CC et les batteries, un bus à CA pour les générateurs à CA et le système de distribution.

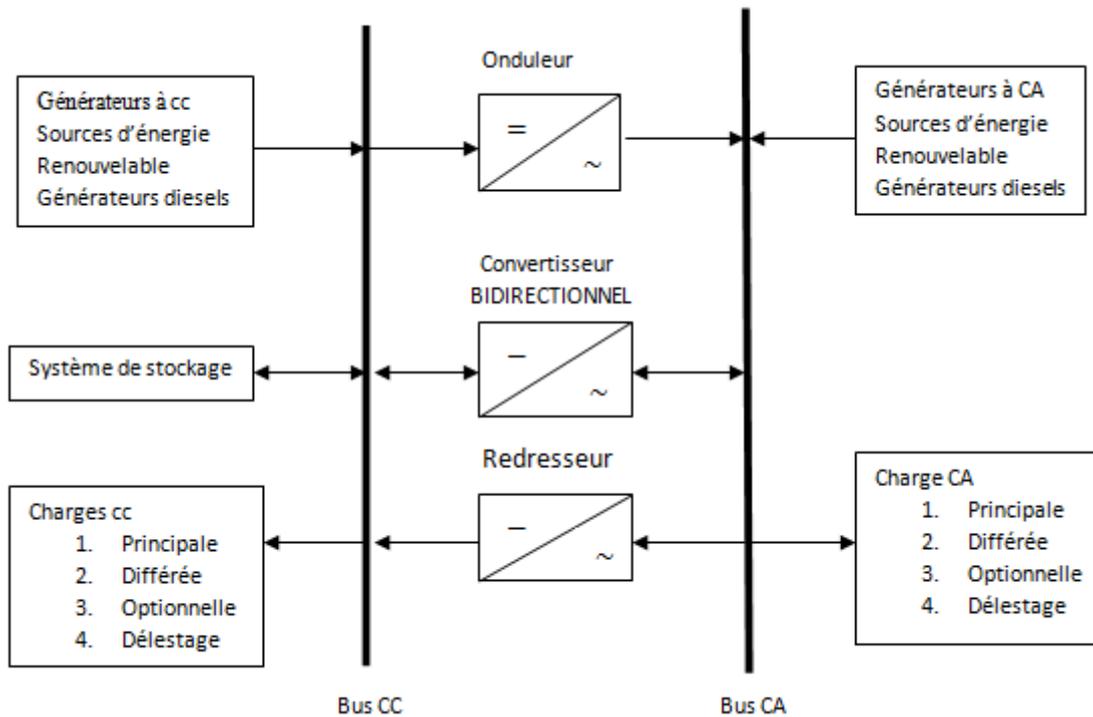


Figure I.1 Architecture des systèmes hybrides d'énergie [5]

I.2.1 Configuration du bus dans les systèmes hybrides

Les générateurs électriques d'un système hybride peuvent être connectés de différentes manières, qu'ils soient à énergie renouvelable pure, non renouvelable pure ou mixte. Deux configurations, s'imposent parmi les systèmes d'énergie hybride constitués de sources d'énergie renouvelable, avec ou sans stockage [6].

I.2.1.1 Architecture à bus continu CC

Dans le système hybride présenté dans la figure (I.2), la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus continu. Ainsi, les systèmes de conversion d'énergie à courant alternatif (CA) fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être convertie ensuite en courant continu (CC). Les générateurs sont connectés en série avec l'onduleur pour alimenter les charges alternatives. L'onduleur doit alimenter les charges alternatives à partir du bus continu.

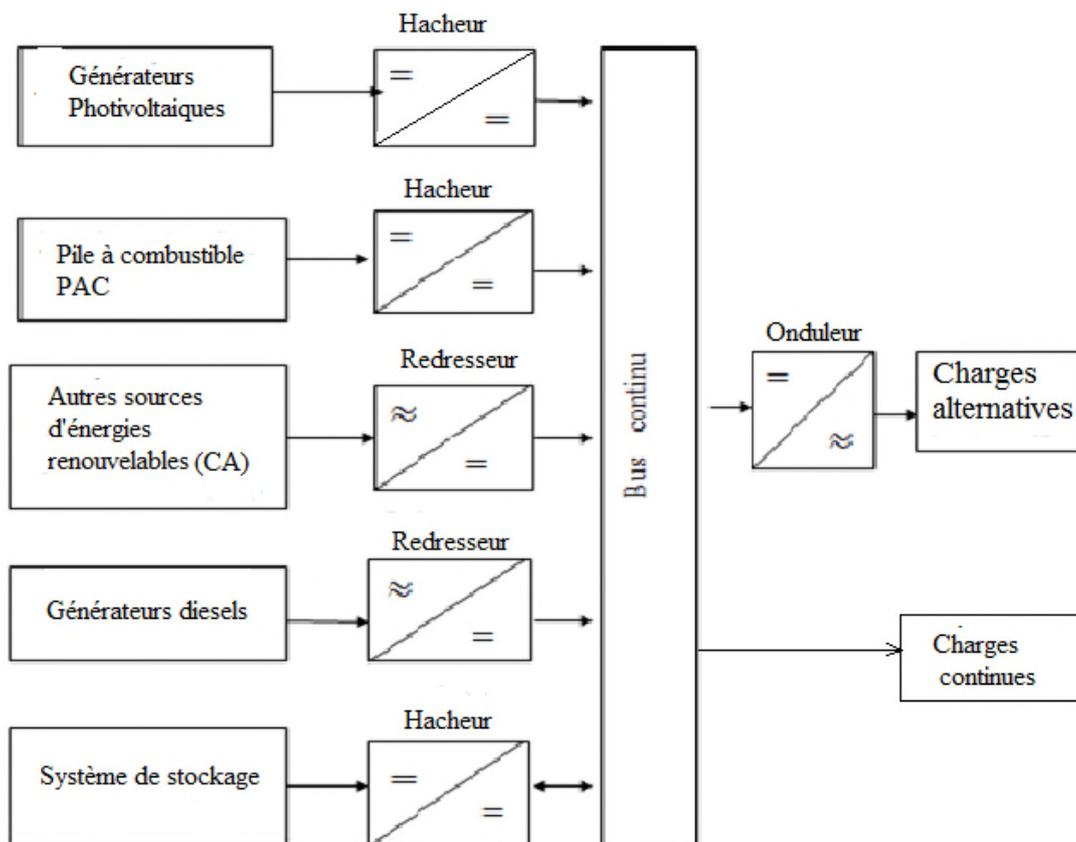


Figure I.2 Configuration du système hybride à bus continu [5]

I.2.1.2 Architecture à bus alternatif AC

Dans cette topologie, tous les composants du système hybride sont reliés à la charge alternative, comme montrée sur la figure (I.3). Cette configuration présente des performances supérieures par rapport à la configuration antérieure, puisque chaque convertisseur peut être synchronisé avec son générateur de sorte qu'il puisse alimenter la charge indépendamment et simultanément avec les autres convertisseurs. Ceci offre une flexibilité pour que les sources d'énergie puissent satisfaire la demande de la charge. Dans le cas d'une faible demande de charge, tous les générateurs et les systèmes de stockage 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.

Chapitre I Généralités sur les systèmes électriques hybrides

La réalisation de ce système est relativement compliquée à cause du fonctionnement parallèle, en synchronisant les tensions de sortie avec les tensions de charge.

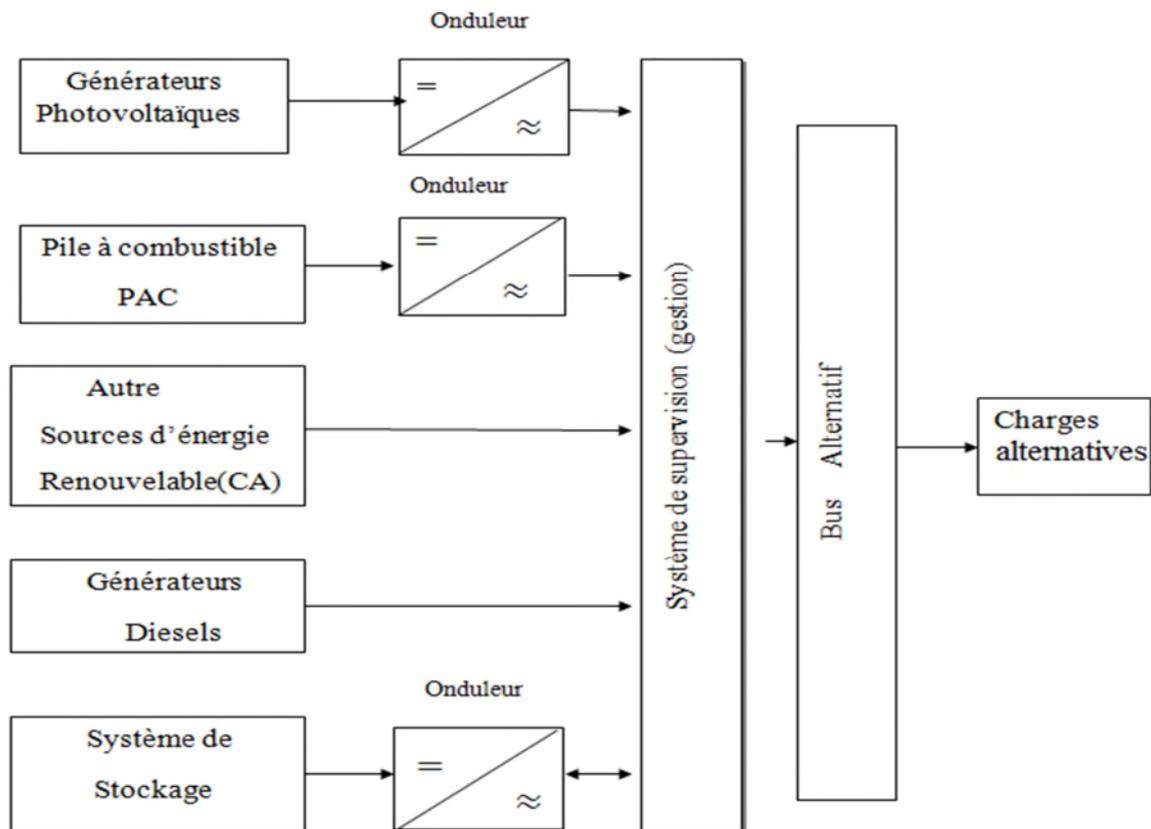


Figure I.3 Configuration du système hybride à bus alternatif [7]

I.2.2 Avantages et inconvénients d'un système hybride

I.2.2.1 Avantages

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

I.2.2.2 Inconvénients

- Coût d'investissement élevé comparé aux générateurs diesel ;
- Plus complexe que les systèmes électrique isolés, et nécessite des systèmes de stockage (batteries) ;
- Pas encore entièrement en production commerciale, donc peu de fournisseurs.

I.3 Généralités sur les systèmes photovoltaïques

Pour un développement durable, les ressources énergétiques renouvelables sont « propres » et inépuisables, donc capables à long terme de satisfaire la majeure partie de nos besoins.

La prise de conscience que les coffres forts de la nature s'épuisent inexorablement est récente, mais les comportements sont longs à modifier. Sauf pour le bois, il faut des millions d'années pour que la nature fabrique des combustibles comme le charbon, le pétrole, ou le gaz naturel. Les énergies renouvelables sont des énergies issues du soleil, du vent, de la géothermie, des chutes d'eau, des marées ou de la biomasse ; leur exploitation n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes : ce sont les énergies de l'avenir.

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, elle pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis long temps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque.

Les cellules photovoltaïques (PV) ouvrent la possibilité de produire de l'électricité directement à partir du rayonnement solaire, sans nécessiter ni pièces mobiles, ni production de chaleur et sans entraîner de pollution atmosphérique, locale ou globale.

Ainsi que l'énergie produite est continu donc elle peut être stocké facilement pour l'utilisé une autre fois.

I.3.1 Historique

La conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, a été découverte par **Antoine Becquerel** en 1839, mais il faudra attendre près d'un siècle pour que les scientifiques approfondissent et exploitent ce phénomène de la physique.

L'énergie photovoltaïque s'est développée dans les **années 50** pour l'équipement de vaisseaux spatiaux et le premier a été lancé dans l'espace en 1958. C'était le seul procédé non-nucléaire d'alimenter des satellites en énergie. Les images satellites reçues par nos téléviseurs ne nous parviennent que grâce à l'énergie photovoltaïque.

Chapitre I Généralités sur les systèmes électriques hybrides

Pendant les années 70 et 80, des efforts ont été faits pour réduire les coûts de sorte que l'énergie photovoltaïque soit également utilisable pour des applications terrestres. La croissance de l'industrie fut spectaculaire.

Depuis le début des années 80, la quantité de modules photovoltaïques expédiés par an (mesurés en MW-Crêtes) a augmenté et le prix des modules (par Watt-Crête) diminuait au fur et à mesure que le nombre de modules fabriqués augmentait. Bien que le prix se soit quelque peu stabilisé, la quantité de modules photovoltaïques expédiés chaque année continue d'augmenter [8].

I.3.2 Chronologies

1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque ;

1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la seconde guerre mondiale, le phénomène reste encore une découverte anecdotique ;

1954 : Trois chercheurs américains, Chaplin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites ;

1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace ;

1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware ;

1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie ;

1995 : Des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001[8].

I.3.3 Energie solaire

Le soleil est une source d'énergie quasiment inépuisable qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré répartie

Chapitre I Généralités sur les systèmes électriques hybrides

sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année.

Albert Einstein a découvert en travaillant sur l'effet photoélectrique que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie est portée par des particules, les photons. L'énergie d'un photon étant donnée par la relation:

$$E = \frac{h.c}{\lambda} \quad (\text{I.1})$$

h : Constante de Planck ;

c : Vitesse de la lumière ;

λ : Longueur d'onde.

L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés:

- Energie solaire thermique: qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux solaires. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité (centrales solaires thermodynamiques).
- Energie solaire photovoltaïque: qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans des nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon.

I.3.4 Cellule photovoltaïque

Les cellules solaires photovoltaïques sont des dispositifs de conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique [9].



Figure I. 4 Cellule solaire photovoltaïque [9]

I.3.4.1 Conversion photovoltaïque

La conversion d'énergie photovoltaïque met en jeu trois phénomènes physique, intimement liés et simultanés :

- Absorption de la lumière dans le matériau ;
- Transfert d'énergie des photons aux charges électriques;
- Collecte des charges.

I.3.4.2 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Le principe de fonctionnement de la cellule repose sur l'effet photovoltaïque qui converti directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière.

La fabrication des cellules s'effectue à partir de lingots de silicium. Ces lingots sont découpés en fines couches de type P ou N en y diffusant du brome ou du phosphore. Une cellule solaire est alors obtenue en constituant une jonction de deux zones de type opposé (jonction PN).

Au voisinage de la jonction apparaît un champ électrique qui maintient la séparation des charges positives et négatives. Des contacts métalliques en formes de grille, contacts avant et arrière, sont déposés (figure I.5).

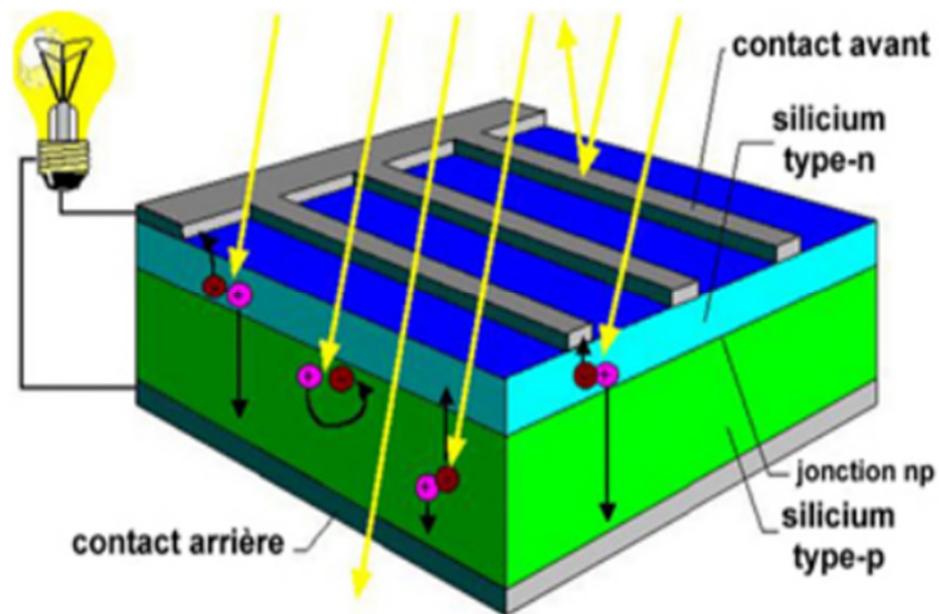


Figure I.5 Représentation schématique d'une cellule solaire [10]

Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure I.6

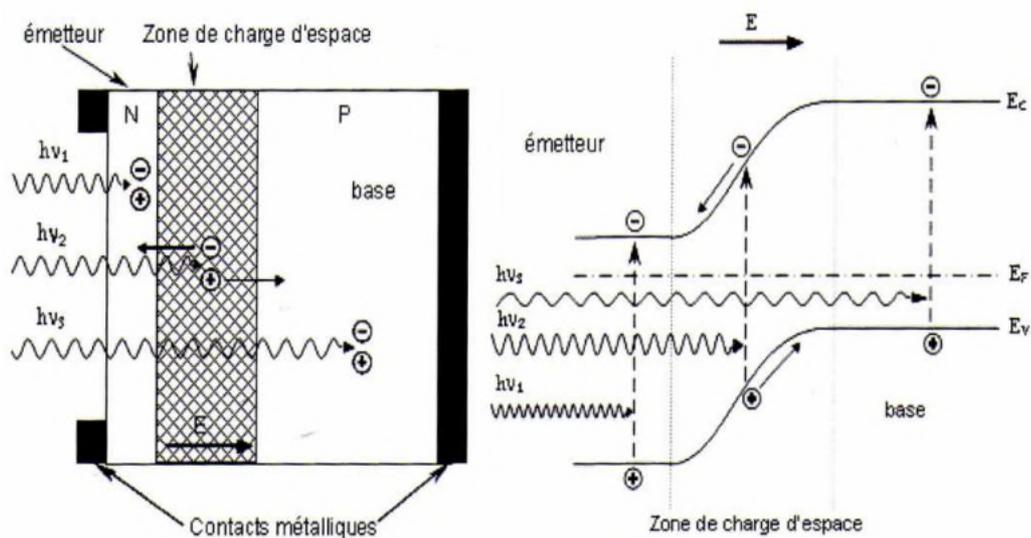


Figure I.6 Structure et diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque [10]

Les photons incidents créent des porteurs dans la zone N et P et dans la zone de charge d'espace.

Les photo-porteurs auront un comportement différent suivant la région :

Chapitre I Généralités sur les systèmes électriques hybrides

- Dans la zone N ou P, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont envoyés par le champ électrique dans la zone P (pour les trous) ou dans la zone N (pour les électrons) où ils seront majoritaires. On aura un photo-courant de diffusion.
- Dans la zone de charge d'espace, les paires électron/trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons vont aller vers la jonction N, et les trous vers la jonction P. On aura un photo-courant de génération [10].

I.3.4.3 Matériaux utilisés dans les cellules PV

Les cellules photovoltaïques sont constituées de semi-conducteurs à base de silicium (Si), de germanium (Ge), de sélénium (Se), de sulfure de cadmium (CdS), de tellure de cadmium (CdTe) ou d'arséniure de gallium (GaAs). Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques, car il est très abondant dans la nature. On le trouve dans la nature sous forme de pierre de silice. La silice est un composé chimique (dioxyde de silicium) et un minéral de formule SiO_2 . Il est le principal constituant des roches sédimentaires détritiques (sables, grès).

Les différents types de cellules PV existants sont :

- Cellule en silicium amorphe (rendement : 6 à 10%) ;
- Cellule en silicium monocristallin (rendement : 13 à 17%) ;
- Cellule en silicium poly cristallin (rendement : 11 à 15%) ;
- Cellule Tandem (rendement : 12 à 18%) ;
- Cellule en matériaux organiques (rendement : 3.6%).

I.3.4.4 Caractéristique courant-tension et puissance-tension

La cellule étant chargée par une résistance, lorsque l'on éclaire la jonction PN, on observe l'apparition d'un courant inverse (I) sous une tension en sens direct (V). La jonction fonctionne en photopile, c'est l'effet photovoltaïque. La caractéristique d'une jonction PN non éclairée est celle d'une diode. En présence d'un éclairement, elle joue le rôle d'un générateur de courant DC, dont la caractéristique est montrée à la figure (I.7).

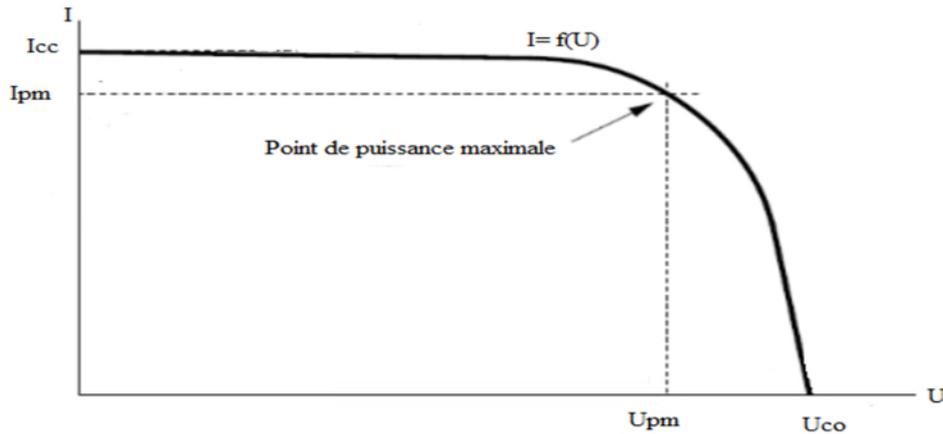


Figure I.7 Caractéristique $I=f(V)$ d'un panneau PV [6]

I.3.4 .5 Groupement des cellules photovoltaïques

a) Mise en série

Une association de nombre cellules (N_s) en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque et donc accroître la puissance, les cellules sont alors traversées pour le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, l'équation (1.2) résume les caractéristiques électrique d'une association de nombre cellules en séries N_s [10].

$$V_{s.co} = N_s \cdot V_{co} \quad (I.2)$$

Avec V_{co} : La tension du circuit ouvert ;

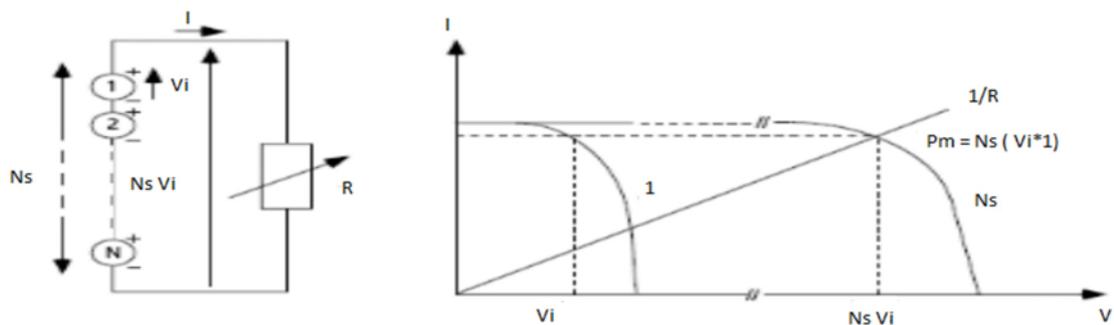


Figure I.8 Caractéristique résultantes d'un regroupement de N_s cellules en série

b) Mise en parallèle

D'autre part une association parallèle de N_p est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en

Chapitre I Généralités sur les systèmes électriques hybrides

parallèle. Les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants. L'équation (I.3) résume les caractéristiques électriques d'une association de N_p .

$$I_{cc,p} = N_p \cdot I_{cc} \quad (I.3)$$

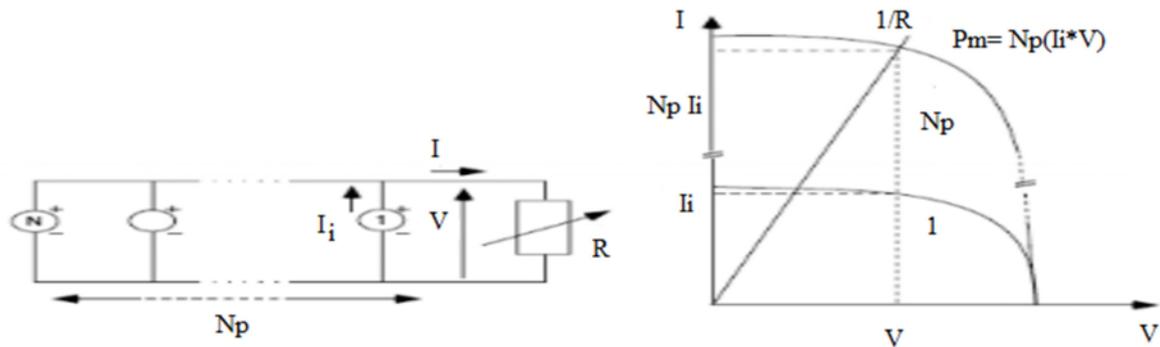


Figure I.9 Caractéristique résultantes d'un regroupement de N_p cellules en parallèle

I.3.5 Module photovoltaïque

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module. Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthylène, vynil, acétate) et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière d'un polyéthylène. La figure (I.10) montre le schéma d'un module PV [11].

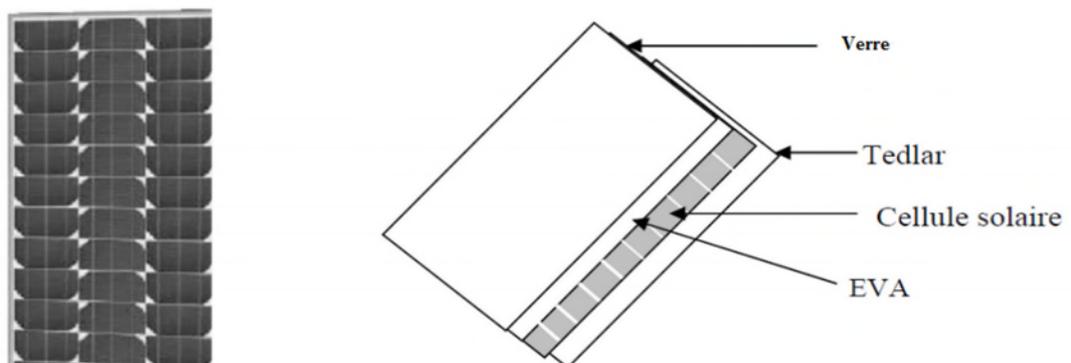


Figure I.10 Module photovoltaïque [11]

I.3.5.1 Caractéristiques d'un module

- **Puissance crête PC**: la puissance électrique maximale que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m²) ;
- **Tension à vide VOC** : tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil " ;
- **Courant de court-circuit ICC** : courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil " c'est la plus grande valeur de courant généré par un module pour une tension nulle $V_{pv} = 0$;
- **Point de fonctionnement optimale** (U_m, I_m) : lorsque la puissance de crête est maximale en plein soleil $P_m = U_m \times I_m$;
- **Rendement** : rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente ;
- **Facteur de forme** : Rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance maximale que peut avoir la cellule : $V_{oc} \times I_{cc}$.

I.3.6 Panneau photovoltaïque

Le panneau photovoltaïque ou (champ solaire) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique [12].

Le composant le plus crucial de toute installation PV est le module PV, qui se compose de piles solaires interconnectées. Ces modules sont raccordés entre eux pour former des panneaux et des ensembles (champs) de manière à pouvoir satisfaire différents niveaux de besoins en énergie, comme le montre la figure (I.11) [13].

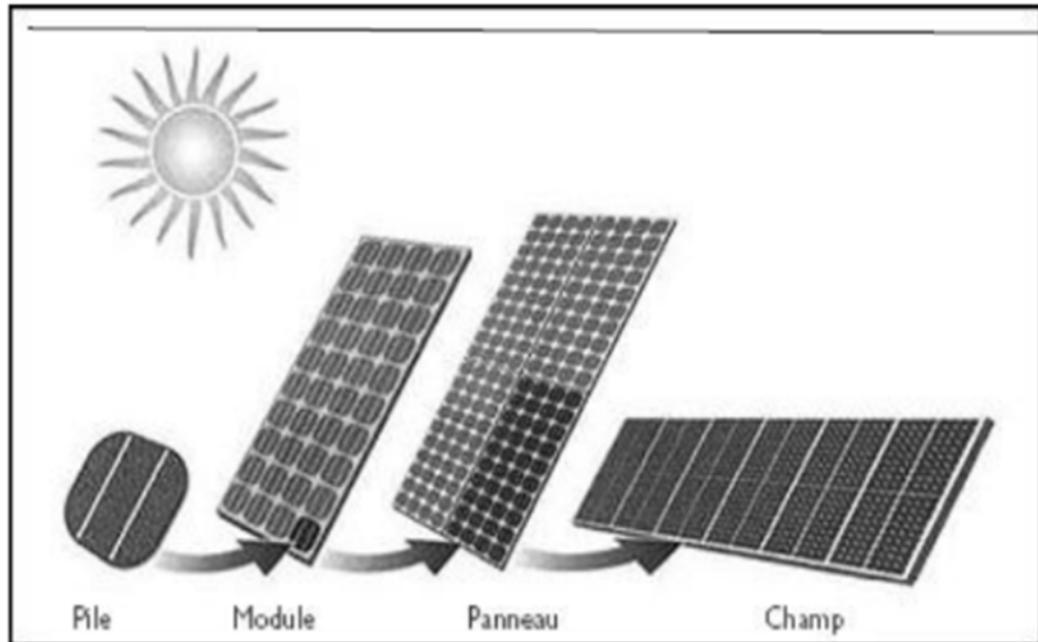


Figure I.11 Panneau photovoltaïque [14]

I.3.7 Champ photovoltaïque

Le champ photovoltaïque est l'ensemble des panneaux montés en série et en parallèle pour atteindre une tension et un courant plus grands. Pour déterminer le nombre de panneaux à utiliser en série et en parallèle, on part de la tension nominale à atteindre que l'on divise par la tension au point de puissance maximale d'un panneau [14].

I.3.8 Avantages et inconvénients

I.3.8.1 Avantages

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages ;

- D'abord, une haute fiabilité - elle ne comporte pas de pièces mobiles - qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux ;
- Ensuite, le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatts au Mégawatts ;

Chapitre I Généralités sur les systèmes électriques hybrides

- Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé ;
- Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

I.3.8.2 Inconvénients

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients :

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé ;
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%) ;
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée ;
- Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du système photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis.

I.4 Les convertisseurs statiques

Les convertisseurs sont les appareils servant à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant soit à une tension continue différente, soit à une tension alternative.

I.4.1 Convertisseur DC/DC (hacheur)

Les convertisseurs continus ont pour fonction de fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe. La tension continue de départ peut être un réseau alternatif redressé et filtré, une batterie d'accumulateurs ou une alimentation stabilisée [15].

Chapitre I Généralités sur les systèmes électriques hybrides

I.4.2 Convertisseur DC/AC (onduleur)

La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant continu, produit par les sources continues (générateur solaire), en courant alternatif monophasé ou triphasé. Un onduleur est habituellement conçu pour fonctionner sur une plage de tension assez réduite [15]. Nous distinguons plusieurs types d'onduleurs suivant la qualité du signal de sortie :

- Onduleur à modulation de largeur d'impulsion MLI (pulse-width modulation) ;
- Onduleur à onde sinusoïdale.

I.4.3 Convertisseur AC/DC (Redresseur)

Le redresseur commandé est le montage le plus simple des montages d'électronique de puissance et permet de transformer l'énergie alternative provenant en général du réseau électrique en une énergie unidirectionnelle quasi-continue que l'on peut diriger vers les charges à courant continu (moteurs à courant continu) [15].

I.5 Pile à combustible

L'ensemble des technologies d'hydrogène, de la production à l'utilisation en passant par les technologies de stockage, de transport et de distribution de ce vecteur énergétique de futur, est appelé à jouer un rôle essentiel dans l'émergence d'une filière hydrogène majeure essentiellement utilise en tant que gaz dans des procédés de chimie industrielle, l'hydrogène est aujourd'hui envisagé comme vecteur énergétique de grande échelle; on parle d'hydrogène énergie. Du côté de l'utilisation finale, il pourra être associé aux piles à combustible [15].

I.5.1 Pile à combustible : historique et applications

La possibilité de produire de l'électricité à partir de la réaction chimique entre l'hydrogène et l'oxygène, appelée principe de l'électrolyse inverse, fut énoncée pour la première fois en 1802 par Sir Henry David. Partant de ce procédé, Sir William Grove expérimente en 1839 la première pile à combustible avec des électrodes en platine dans un milieu acide sulfurique dilué.

La pile à combustible a connu son émergence grâce à la NASA qui cherchait un moyen de produire de l'électricité à bord de ses engins spatiaux : des PAC furent utilisées avec succès par la capsule Gemini en 1964. L'intérêt pour l'utilisation de cette technologie dans le

Chapitre I Généralités sur les systèmes électriques hybrides

domaine des transports remonte à 1973, date de la première crise pétrolière. En 1993 un bus à PAC est réalisé par l'entreprise Ballard en partenariat avec le constructeur automobile Daimler-Benz [16].

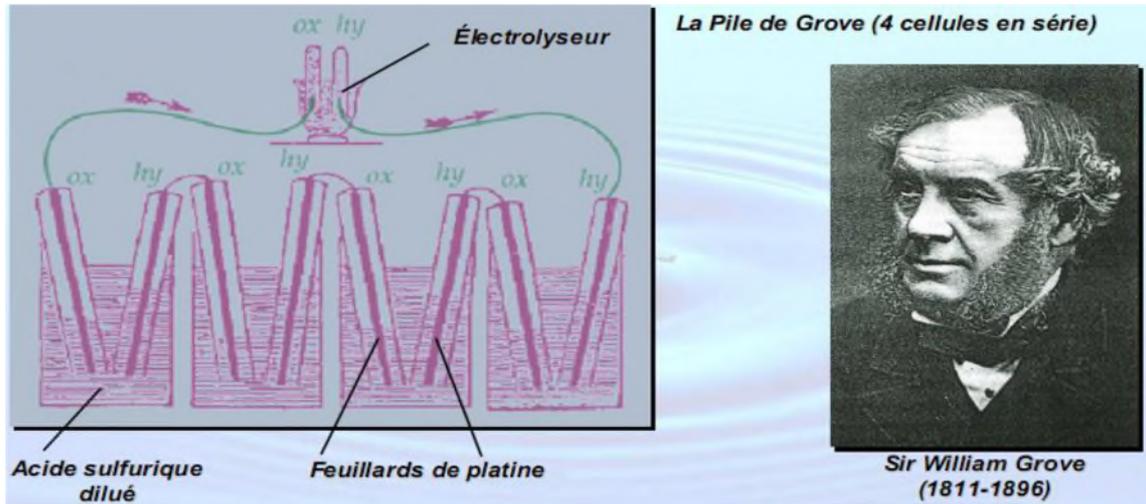


Figure I.12 Expérience de sir W. Grove en 1839 [16]

I.5.2 Définition

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) en énergie électrique. Dans le cas d'une pile "hydrogène/oxygène", la réaction globale est donnée par l'équation (I.4). Le bilan de la réaction finale est : l'électricité, l'eau et la chaleur.



Une pile à combustible est constituée d'un empilement d'éléments anode-électrolyte-cathode reliés par l'intermédiaire d'un interconnecteur (ou plaques bipolaires) formant un module comme illustré à la figure (I.13) [17].

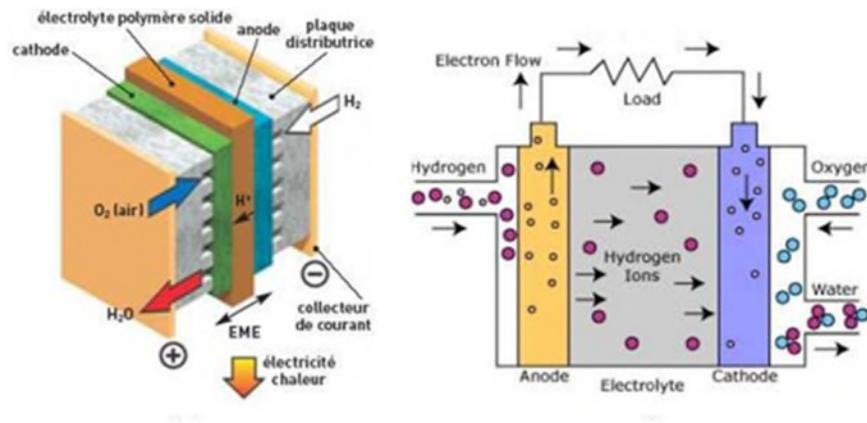


Figure I.13 Schéma de principe d'un assemblage de cellules élémentaires cathode/électrolyte/anode

I.5.3 Différents types de piles à combustible

Les PAC sont principalement distinguées par :

- La nature de leur électrolyte qui donne son nom à la pile. L'électrolyte peut être liquide ou solide, acide ou alcalin ;
- La température de fonctionnement. Généralement, une pile basse température fonctionne à des températures inférieures à 200 °C. Au-delà de cette valeur, la pile est dite haute température ;
- Le combustible consommé, la plupart des piles utilisent l'hydrogène. Il y en a qui font un reformage interne pour convertir d'autres gaz combustibles en hydrogène. La pile à méthanol direct par exemple permet d'établir une oxydation du méthanol liquide.

Actuellement, les différentes PAC peuvent être classées en deux grandes catégories, suivant leur température de fonctionnement [18] :

a) Piles fonctionnant à basse température sont :

- les PEMFC (piles à membrane échangeuse des protons) ;
- les DMFC (piles à méthanol direct) ;
- les AFC (piles alcalines) ;
- les PAFC (piles acide phosphorique).

b) Piles fonctionnant à haute température sont :

- Les SOFC (piles à électrolyte solide) ;
- Les MCFC (piles à carbonate fondu).

Chapitre I Généralités sur les systèmes électriques hybrides

Les principales caractéristiques et propriétés de ces différentes piles données dans le tableau I.1 [18]

Tableau I.1 Les principales caractéristiques et propriétés des différentes pile

	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	CSOF	DMFC
Electrolyte	Polymère Conducteur De protons	Solution alcaline	Acide Phosphorique	Carbonate Fondu	Céramique	Polymère Conducteur De protons
Catalyseur	Platine	Platine	Platine	Nickel et L'oxyde de Nickel	Cermet Nickel-Zircon	Platine
Charge mobile	H^+	OH^-	H^+	CO_3^{-2}	O^2	H^+
Température De Fonctionnement En (c°)	40 – 90	65 - 220	205	650	600 - 1000	50 -130
Rendement Electrique pile En (%)	35 – 40	60 – 70	50	65	45 -65	20 – 30
Champs D'applications	Automobile, Cogénération	Application Spatiales	Cogénération	Cogénération	Cogénération	Application Mobiles

I.5.4 Choix technologique de la pile à combustible [19] :

Parmi ces différents types, nous nous intéresserons dans ce travail aux piles PEM qui sont le mieux adaptées non seulement aux applications stationnaires est de transport. La technologie PEM retient l'attention pour trois raisons essentielles.

- 1) Sa température de fonctionnement relativement basse laisse envisager une technologie simplifiée pour assurer un démarrage rapide et une évacuation aisée de la chaleur produite à température ambiante, ce premier point est essentiel pour des applications dans le domaine de la traction électrique ;
- 2) Elle est, ensuite, insensible à la présence de (CO_2) dans l'air, contrairement à la filière alcaline ;

- 3) Enfin, elle est de technologie « tout solide » et donc peut à la fois prétendre à des durées de vie supérieures aux piles à électrolyte liquide (pas de pièces mobiles au sein du convertisseur) ainsi qu'une industrialisation plus aisée : ceci permet d'envisager un coup prospectif compatible avec le marché visé, d'autant qu'elle offre une compacité sensiblement supérieure à celle des autres filières.

I.5.5 Principe de fonctionnement

Une PAC est un dispositif électrochimique qui convertit directement l'énergie chimique d'une réaction en énergie électrique tout en dégageant de la chaleur et de l'eau. Le principe de fonctionnement de la pile est basé sur l'électrolyse inverse [17], qui met en évidence la possibilité de produire de l'électricité et de la chaleur à partir de la réaction chimique entre le combustible et le comburant. Le principe de fonctionnement est illustré dans la figure(I.14).

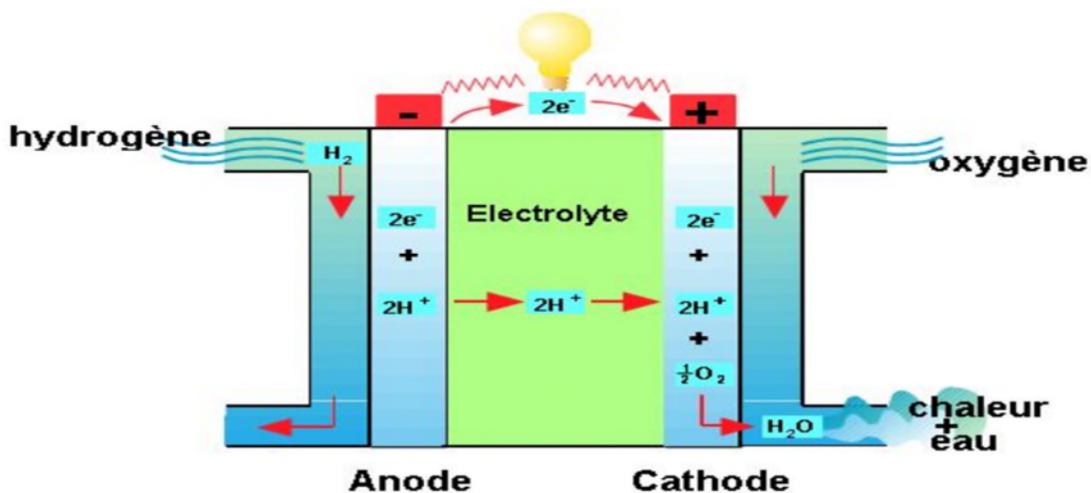


Figure I.14 Principe de fonctionnement [17]

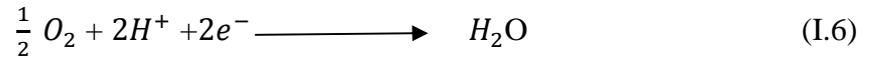
Du côté de l'anode (pôle négatif), les molécules de l'hydrogène injecté (H_2) réagissent avec le catalyseur en platine pour donner des protons (H^+) et des électrons (e^-) selon le système d'équations suivant :



Les protons d'hydrogène passent à travers la membrane électrolytique pour arriver à la cathode (pôle positif) tandis que les électrons circulent à travers un circuit externe pour générer un courant électrique.

Chapitre I Généralités sur les systèmes électriques hybrides

Du côté de la cathode, les ions H^+ se combinent avec les ions O^- , constitués à partir de l'oxygène, pour former de l'eau selon la réaction :



Finalement, le bilan de la réaction globale est :



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

I.5.6 Description de la cellule

L'élément de base principal du cœur de la pile est la cellule élémentaire. Celle-ci est constituée d'un empilement regroupant les électrodes (anode et cathode), l'électrolyte (membrane), les couches de diffusion et les plaques bipolaires. La figure (I.15) illustre ces différents composants de la cellule.

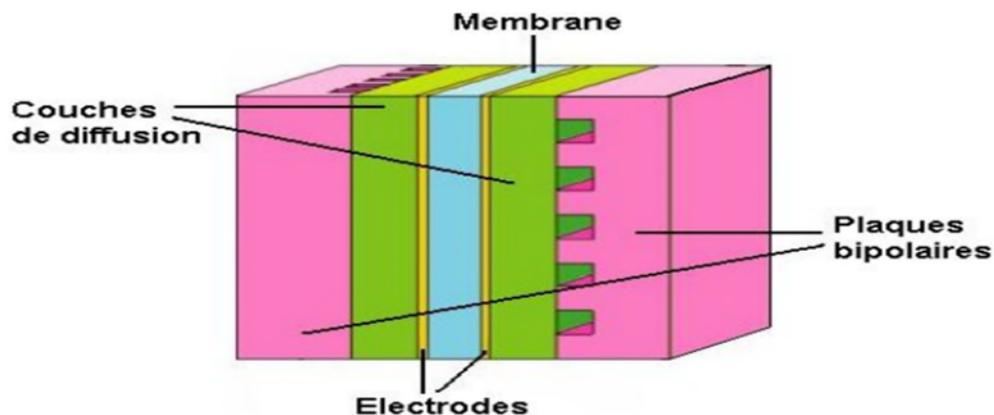


Figure I.15 Assemblage d'une cellule élémentaire [17]

I.5.6.1 Plaques bipolaires

Les plaques bipolaires remplissent 2 rôles. D'une part elles distribuent les gaz de manière uniforme à l'assemblage EME par le biais de fins canaux. D'autre part, elles permettent la

Chapitre I Généralités sur les systèmes électriques hybrides

circulation d'un fluide de refroidissement pour refroidir la cellule élémentaire. Les plaques bipolaires doivent être conductrices et résister à un environnement corrosif (par exemple, le graphite ou l'acier inoxydable sont utilisés).

I.5.6.2 Couches 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 [19].

I.5.6.3 Electrodes (anode et cathode)

Les électrodes sont le siège des réactions chimiques d'oxydoréduction qui mettent en jeu à la fois. L'oxygène, les protons en solution (H^+) et le platine (catalyseur solide).

Le catalyseur le plus utilisé pour les électrodes est le platine pur ou allié à un élément de transition, le platine est le seul métal qui possède l'activité électro catalytique suffisante vis-à-vis de la réduction d'oxygène et de l'oxydation de l'hydrogène. De plus, il résiste durablement à la corrosion dans un tel environnement chimique très acide [19].

I.5.6.4 Electrolyte

L'électrolyte (cœur de la cellule) est une membrane conductrice protonique. Il est pris entre deux électrodes intégrées entre les couches de diffusion. L'ensemble de tous ces éléments est assemblé entre deux plaques bipolaires (figure I.16).

Son rôle principal est de permettre le transfert des protons H^+ de l'anode vers la cathode tout en évitant le passage des électrons [19].

I.5.7 Applications des piles à combustibles

On distingue habituellement les applications des piles à combustible entre applications portables, stationnaires et embarquées [20].

Chapitre I Généralités sur les systèmes électriques hybrides

a) Applications portables

Celles-ci incluent le téléphone mobile d'une puissance moyenne de l'ordre de 400 mW et l'ordinateur portable d'une puissance moyenne de 10 W. Ces applications connaissent une très forte croissance et les recherches les plus importantes sont axées sur l'utilisation d'une pile à combustible chargeant une petite batterie qui assure mieux l'apport d'énergie lors des pics d'émission. L'autonomie n'est alors limitée que par la taille du réservoir d'hydrogène ou de méthanol. L'utilisateur recharge son portable comme on recharge un briquet ou un stylo à encre, en quelques secondes et chaque recharge donne 3 à 5 fois plus d'autonomie qu'une batterie actuelle, pour le même encombrement.

a) Applications embarquées

Le transport est le domaine d'application à l'origine du développement de la pile à combustible vers le début des années 90. Compte tenu de la contrainte de coût, particulièrement forte dans ce secteur, et de la concurrence de la technologie traditionnelle (moteur thermique), il faut distinguer deux sous-familles assez différentes suivant qu'il s'agit d'équiper un véhicule léger ou un véhicule lourd. Il est demandé au véhicule léger quelque 3000 h de fonctionnement pour une dizaine d'années de durée de vie alors qu'un véhicule lourd (transport de passagers ou marchandises) exige une durée de fonctionnement bien plus importante.

b) Applications stationnaires

Compte tenu des tendances vers la décentralisation de la production d'énergie électrique, ce secteur intéresse de nombreux industriels. L'activité est centrée sur deux grands domaines d'applications : la production collective (les puissances sont dans la gamme de 200 kW à quelques MW) et la production domestique (les puissances sont dans la gamme de 2 à 7 kW).

De nombreux projets et démonstrations existent déjà dans le premier domaine. Ils sont généralement basés autour de la technologie PEMFC même si d'autres technologies (MCFC, SOFC) font également l'objet de tests mais ne sont pas encore au stade d'une commercialisation. Dans le deuxième domaine, plusieurs projets sont également en cours de réalisation.

Chapitre I Généralités sur les systèmes électriques hybrides

Des tests sont actuellement réalisés avec plusieurs prototypes en situation réelle. Ces appareils basés sur une technologie de type PEMFC fournissent l'électricité et la chaleur (chauffage et eau chaude). Ils sont alimentés par des combustibles classiques : un reformeur transforme le combustible hydrocarbure (généralement du gaz naturel) en hydrogène. Ce sera probablement le premier marché de masse à être occupé par la technologie pile à combustible.

I.5.8 Avantages et inconvénients des piles à combustible de type PEM [19]

I.5.8.1 Avantages

- Un rendement de conversion important : grâce à la conversion de l'enthalpie libre de la réaction chimique en énergie électrique, les pertes dues normalement à la combustion du combustible, puis à la conversion de cette chaleur de combustion en énergie mécanique et enfin de l'énergie mécanique en électrique sont évitées ;
- Un générateur propre : les piles à combustible ne rejettent pratiquement pas de gaz nocifs (CO_2 , NO_x) au niveau de cœur de pile ;
- Un système modulable : les piles à combustibles dans le sens ou la taille d'une pile à combustibles peut facilement être augmentée ou réduite et le rendement électrique est relativement indépendant de cette taille ;
- Un système relativement silencieux : comme elle ne comporte pas d'une partie mobile au niveau du cœur, le fonctionnement des piles se fait sans nuisances sonores importantes de ce fait, les piles à combustible peuvent être placées à proximité de quartiers résidentiels.

I.5.8.2 Inconvénients

- Un fonctionnement à basse température imposé par la membrane actuellement utilisées. Il s'ensuit la nécessité d'utiliser d'une part comme catalyseur du platine et d'autre part d'alimenter le cœur de pile par de l'hydrogène par ce qui nécessite soit l'utilisation de bouteille soit un mode de reformage performant ;
- Une technologie qui est encore au stade artisanal ce qui induit des coûts de fabrications élevés. Bien que la structure du cœur de pile soit assez simple ;
- Une durée de vie encore faible en particulier si le courant délivré subit des variations importantes et répétées.

I.6 Batteries

Les unités de stockage sont des éléments indispensables dans les systèmes en site isolé. Correctement dimensionnées, elles participent en effet à garantir l'autonomie du site, en constituant une réserve d'énergie lorsque les sources produisent en excédent, et en la restituant lorsqu'elles ne produisent momentanément plus assez. Mais au-delà de cette gestion à moyen terme, elles sont obligatoires dans un système coupé du réseau pour assurer à chaque instant l'équilibre énergétique dans le circuit électrique. En effet, le principe de conservation impose, qu'aux pertes près, la puissance produite par les sources corresponde à la somme de la puissance consommée par l'utilisateur, et de celle absorbée par le système lui-même. À un instant donné, il y a peu de chance que la puissance produite coïncide avec celle consommée.

La différence ne peut être absorbée que par un réseau raccordé à d'autres sources ou utilisateurs pour équilibrer l'équation ; une solution de stockage est donc obligatoire pour assurer cet équilibre, et ainsi faire varier l'énergie interne du système [21].

I.6.1 Présentation des accumulateurs

Dans le principe, les générateurs électrochimiques sont des dispositifs dont la fonction est de transformer l'énergie libérée par des réactions électrochimiques en énergie électrique. Ce processus de conversion d'énergie se produit aux deux électrodes du dispositif (électrode positive et électrode négative) et conduit à la décharge du générateur. En fonction de la réversibilité de ce processus, on peut distinguer les générateurs électrochimiques en deux catégories :

- Système primaire ou pile : dans ce cas la réaction électrochimique est irréversible, le générateur est déchargé une seule fois et de façon définitive ;
- Système secondaire ou accumulateur : dans ce cas la réaction électrochimique est réversible, une source d'énergie extérieure peut être utilisée pour ramener les électrodes à leur état initial et charger le dispositif après sa décharge.

I.6.2 Principe de fonctionnement des accumulateurs

En général, un accumulateur est composé d'une électrode positive (ou cathode en convention générateur), d'une électrode négative (ou anode en convention générateur), d'un séparateur et d'un électrolyte dans lequel sont immergés l'électrode positive, l'électrode négative et le séparateur [22].

Chapitre I Généralités sur les systèmes électriques hybrides

Le principe de fonctionnement d'un accumulateur est basé sur l'exploitation de deux couples oxydo-réducteurs, Ox_1/Red_1 et Ox_2/Red_2 , qui se déroulent respectivement à deux électrodes différentes. La (Figure I.18) résume le principe de fonctionnement des accumulateurs sous la forme d'un schéma simplifié.

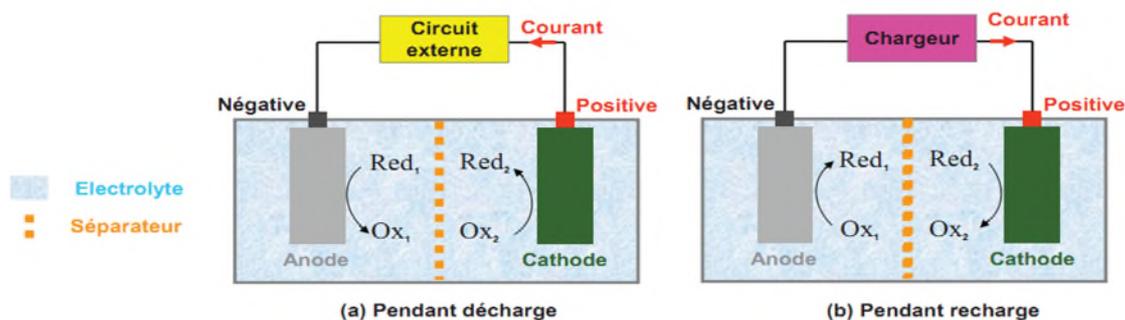


Figure I.16 Principe de fonctionnement des accumulateurs [22]

Il existe de nombreuses technologies d'accumulateur : Plomb, NiMH, NiCd, NiZn, famille de lithium-ion (Li-ion). On donne ci-dessous un tableau de comparaison entre différents types de batteries.

Tableau I.2 Comparaison des caractéristiques techniques des batteries [7]

Technologie	plomb	Ni/Cd	Ni/MH	Li/ION
Energie Spécifique (Wh/Kg)	35 - 50	50 - 60	70 - 95	60 - 130
Puissance Spécifique (W/Kg)	80 - 150	150 - 400	200 - 1000	500 - 400
Rendement (%)	>80	75	70	>95
Nombre cycle	500 - 1000	800	750 - 1200	1000
Avantage	Faible coût	Faible Performances et froid	Très bonne densité d'énergie	Excellente puissance et énergie
Inconvénient	Durée de vie	toxicité	Comportement en température	Le cout élevé

Notre travail consiste à étudier un système multi source avec stockage et on a opté pour une batterie au plomb acide et cela pour les raisons suivantes :

- Faible coût ;
- Meilleur compromis en termes de coût / performance /entretien ;
- Sa durée de vie ;
- Caractéristique électrochimique favorable ;
- Une large disponibilité ;
- Entretien faible ou nul ;
- Bonne tenue aux températures extrêmes.

I.6.3 Quelques notions concernant l'accumulateur

I.6.3.1 Relation entre les noms « accumulateur », « cellule » et « batterie »

Les accumulateurs s'ils sont seuls sont parfois appelés éléments de la batterie ou cellules, une batterie contient donc un ou plusieurs accumulateurs.

I.6.3.2 Plage de tension

Chaque batterie a une plage de tension de fonctionnement qui définit la tension minimale et la tension maximale qu'elle peut atteindre. La tension minimale est aussi appelée « tension d'arrêt ». Si la batterie fonctionne en dehors de sa plage de tension, il y a des risques de dégradations.

I.6.3.3 Capacité

De façon générale, la capacité C d'une batterie est la quantité de charges électriques pouvant être délivrée lors d'une décharge complète à une amplitude de courant définie. La capacité C de la batterie est mesurée en Ampère-heure et l'amplitude du courant utilisé pour mesurer cette capacité est souvent exprimée en fonction de la capacité nominale. Par exemple, si la capacité d'une batterie est de 0.36 Ah à 1C, cela signifie que si la batterie pleinement chargée est déchargée par un courant de 0.36 A, elle va atteindre sa tension d'arrêt après une heure de décharge. La capacité déchargée est $0.36 \text{ A} \times 1 \text{ h} = 0.36 \text{ Ah}$, un courant de 1C signifie $1 \times 0.36 = 0.36 \text{ A}$. Dans la même logique, un courant de 10C signifie $10 \times 0.36 = 3.6 \text{ A}$.

I.6.3.4 Rendement faradique

Le rendement faradique représente l'efficacité de la charge d'une batterie. Il est le rapport de la capacité de la batterie sur la quantité de charge fournie à la batterie lors de la charge complète. A cause des réactions secondaires à l'intérieur de la batterie, la quantité de charge fournie à la batterie n'est pas entièrement récupérable. Ainsi, le rendement faradique peut être inférieur à 100% et varie en fonction de la technologie de la batterie. Par exemple, le rendement faradique est proche de 100% pour les batteries Li-ion et autour de 80~90% pour les batteries NiMH [22].

I.6.3.5 Etat de charge (SOC) et profondeur de décharge (DOD)

L'état de charge (ou *SOC* pour « State of Charge » en anglais) est le rapport de la charge disponible en Ah sur la capacité de la batterie. Par exemple, quand la batterie est pleinement chargée, l'état de charge (*SOC*) vaut 100% et quand la batterie est complètement déchargée, le *SOC* vaut 0%. La définition du *SOC* n'est pas unique, parce que la capacité réelle ou la capacité nominale peuvent être utilisées au dénominateur dans la formule du *SOC*.

$$SOC = 1 - \frac{\text{charge disponible en Ah}}{\text{capacité de la batterie}} \quad (I.8)$$

En pratique, la capacité réelle d'une batterie peut être différente de sa capacité nominale. Le calcul du *SOC* avec la capacité réelle correspond plus précisément à l'état réel de la batterie que le calcul du *SOC* avec la capacité nominale. Ce dernier ne garantit pas la validité des bornes 0% et 100% de *SOC*. Par exemple, pour une batterie avec une capacité nominale de 0.36 Ah, si sa capacité réelle est supérieure à 0.36 Ah et que son *SOC* est déterminé avec la capacité nominale, quand le *SOC* est égal à 0%, la batterie peut encore fournir de la charge, donc 0% de *SOC* dans ce cas ne correspond pas à un état complètement déchargé de la batterie. La capacité réelle est utilisée pour le calcul du *SOC*. Il est à noter que si l'état « complètement déchargé » est déterminé par des ampères heures déchargées, la valeur du courant n'intervient pas pour la définition du *SOC* 0%. Par contre, si l'état « complètement déchargé » est associé à une tension d'arrêt de décharge, alors le courant a une influence sur le *SOC* 0%. Par exemple, une batterie « complètement déchargée » par un courant de 10C, peut encore fournir de la charge sous un courant à 0.1C.

Chapitre I Généralités sur les systèmes électriques hybrides

La profondeur de décharge (ou *DOD* pour « Depth of Discharge » en anglais) est aussi un indicateur de niveau de charge de la batterie. Son expression est donnée par :

$$DOD = 1 - SOC \quad (I.9)$$

I.6.3.6 Tension à vide (OCV) de la batterie

La tension à vide (ou OCV pour « Open Circuit Voltage » en anglais) désigne la tension d'équilibre de la batterie au repos. La valeur de l'OCV évolue en fonction du SOC de la batterie. La Figure (I.19) montre un exemple de la relation OCV(SOC) d'une batterie lithium-ion A123. Il est à noter que les courbes OCV(SOC) mesurées après décharge et après charge peuvent être différentes, la présence des écarts entre les deux courbes étant appelée phénomène d'hystérésis. L'allure du graphe OCV(SOC) peut être modifiée en fonction du temps de repos utilisée pour la mesure expérimentale.

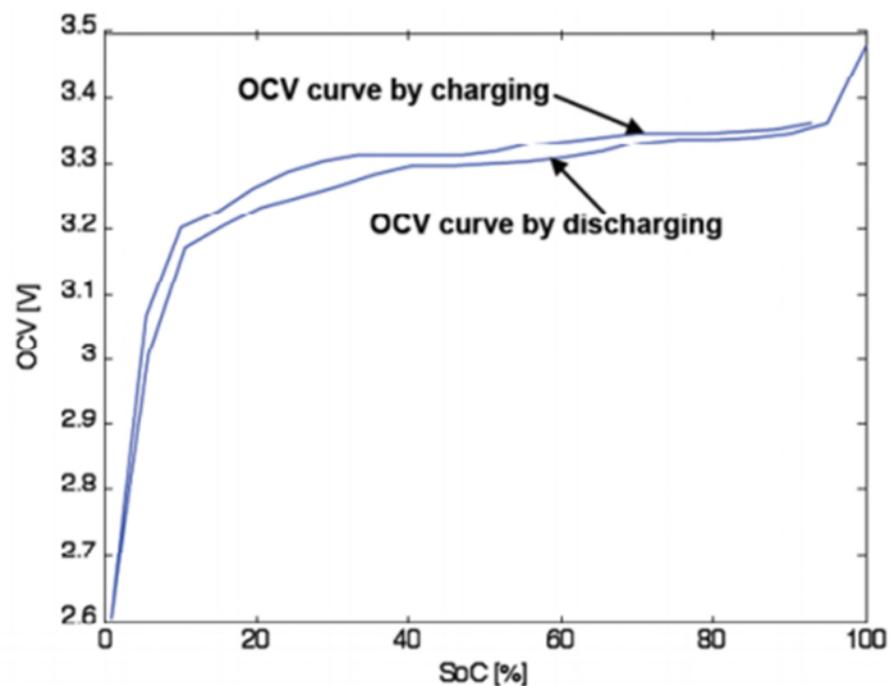


Figure I.17 Courbe OCV(SOC) mesurée 1 h après décharge et après charge d'une batterie A123 à 25°C [23]

I.6.3.7 Tension nominale

La tension nominale est la tension de référence d'une batterie. La définition de la tension nominale n'est pas unique, on peut interpréter la tension nominale comme la tension moyenne

Chapitre I Généralités sur les systèmes électriques hybrides

d'une batterie observée sur la plus grande partie de sa courbe OCV en fonction du SOC après décharge complète. La tension nominale varie en fonction de la technologie de batterie, par exemple, 3.3 V~3.9 V pour une cellule Lithium-ion, autour de 2 V pour une cellule au plomb et autour de 1.2 V pour une cellule NiMH et NiCd.

I.6.3.8 Autodécharge

En raison des réactions secondaires intervenant aux deux électrodes, la batterie se décharge toute seule lentement même quand elle n'est pas utilisée. Ce phénomène de perte d'énergie avec le temps est appelé autodécharge. L'autodécharge s'exprime souvent en pourcentage de la perte de charge par mois par rapport à la capacité de la batterie. Elle dépend de plusieurs facteurs comme la tension, la température et le vieillissement de la batterie. Elle varie aussi en fonction de la technologie de la batterie, par exemple, elle est de l'ordre de 5% par mois pour les batteries Li-ion et les batteries au plomb et de l'ordre de 30% par mois pour les batteries NiMH et NiCd [24].

I.6.3.9 Durée de vie

La durée de vie d'une batterie est souvent exprimée en année ou en nombre de cycles de charge/décharge. Elle dépend de la condition d'utilisation de la batterie (niveau et fréquence de la sollicitation, température de fonctionnement). La batterie est souvent considérée en fin de vie quand sa capacité réelle est de 80% de la capacité initiale. L'état de santé (ou *SOH* pour « State of Health » en anglais) est souvent utilisé pour décrire le niveau de vieillissement de la batterie. La formule de *SOH* est donnée par :

$$SOH = \frac{\text{capacité actuelle de la batterie}}{\text{capacité initiale de la batterie}} \quad (\text{I.10})$$

I.7 Conclusion

Le principal objectif de ce premier chapitre est de présenter l'historique et les différents types de source d'énergie à utiliser dans notre étude (énergie solaire et pile à combustible type (PEMFC), leurs domaines d'application, les avantages de celles-ci par rapport à d'autres sources d'énergies, le principe de fonctionnement et les caractéristiques électriques de chacune de ces sources. Aussi des généralités sur les systèmes électriques hybrides et les éléments de stockages (batteries) ont été exposées. Les sources d'énergie étant choisies, elles

Chapitre I Généralités sur les systèmes électriques hybrides

seront modéliser et dimensionner dans le chapitre qui suit pour qu'elles puissent satisfaire les demandes de puissance des charges.

Chapitre II

Modélisation et simulation des sources d'énergie

II.1 Modélisation d'un générateur photovoltaïque

II.2 Introduction

La modélisation d'un système physique conduit à l'établissement des équations mathématiques régissant la dynamique de ce système, d'où un modèle est la représentation mathématique d'une entité réelle et de son fonctionnement : quand on dispose d'un modèle, on peut simuler le comportement de cette entité.

L'objectif de cette étude consiste à obtenir par simulation, les caractéristiques dynamiques de la cellule photovoltaïque en utilisant le software Matlab version 2009. La cellule solaire est un dispositif semi-conducteur dont le modèle mathématique est toujours lié à ce qu'on veut en faire, mais reste toujours basé sur un circuit électrique avec différents paramètres. Une cellule solaire est représentée (dans la littérature) par plusieurs modèles, chacun d'eux est régi par une expression mathématique (analytique) en fonction des paramètres technologiques de la cellule, tels que le courant et la tension. Ce qui nous ramène à écrire les algorithmes appropriés pour représenter initialement la caractéristique tension-courant puis tension-puissance, etc. Parmi ces modèles on a choisis le modèle à deux diodes:

II.3 Modèle à deux diodes

Le circuit équivalent du modèle à deux diodes est donné sur la figure II.1. Ce modèle est dit le plus proche du comportement réel de la cellule solaire, du fait qu'il tient compte du mécanisme de transport des charges électriques à l'intérieur de la cellule (deux diodes).

Le modèle à deux diodes (équation II.5) est composé de deux exponentiels, le premier tient compte du phénomène de diffusion, tandis que le deuxième exponentiel correspond au phénomène de recombinaison, dans la région de déplétion, par les niveaux profonds [25].

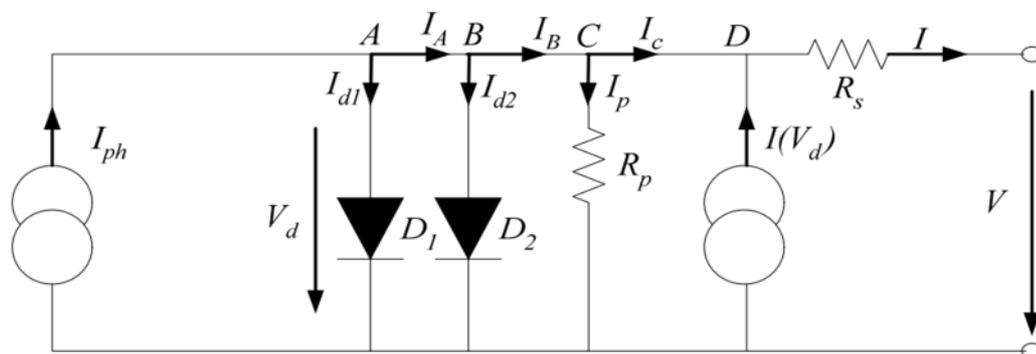


Figure II.1 Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle à deux diodes

Chapitre II Modélisation et simulation des sources d'énergies

Les équations caractéristiques du système sont données ci-dessous :

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_p + I(V_d) \quad (\text{II.1})$$

$$I_{d1} = I_{s1} \cdot \left(e^{\frac{V}{m_1 \cdot VT}} - 1 \right) \quad (\text{II.2})$$

$$I_{d2} = I_{s2} \cdot \left(e^{\frac{V}{m_2 \cdot VT}} - 1 \right) \quad (\text{II.3})$$

$$I(V_d) = -\alpha \cdot (V + I \cdot R_s) \cdot \left(1 - \frac{V + I \cdot R_s}{V_{Br}} \right)^{-n} \quad (\text{II.4})$$

$$I = I_{ph} - I_{s1} \cdot (e^{\tau_1} - 1) - I_{s2} \cdot (e^{\tau_2} - 1) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} - \alpha \cdot (V + I \cdot R_s) \cdot \left(1 - \frac{V + I \cdot R_s}{V_{Br}} \right)^{-n} \quad (\text{II.5})$$

Avec :

$$\tau_1 = \frac{V}{m_1 \cdot VT} \quad \text{et} \quad \tau_2 = \frac{V}{m_2 \cdot VT} \quad (\text{II.6})$$

- I_{s1}, I_{s2} : Courants de saturation de la première et de la deuxième diode respectivement ;
- m_1, m_2 : Facteurs d'idéalité de la première et de la deuxième diode respectivement ;
- V_{Br} : Tension de rupture (-15V...-50V) ;
- α : Facteur de correction ($\alpha = 0 \div 1$) ;
- n : Indice de la rupture d'avalanche ($n=1 \div 10$).

Le schéma du circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque qui est largement utilisé, est représenté sur la figure (II.2).

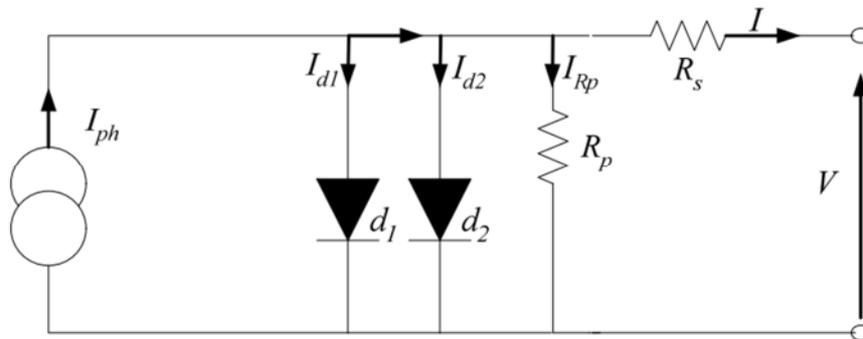


Figure II.2 Schéma du modèle équivalent à deux diodes d'une cellule photovoltaïque [25]

Chapitre II Modélisation et simulation des sources d'énergies

Comme la montre le schéma de la figure II.2 une photopile comporte une résistance série R_s et une résistance en dérivation ou shunt R_p . Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique I-V de la photopile :

- La résistance série est la résistance interne de la cellule, elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.
- La résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

D'après la figure II.2 le modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension est donnée par :

$$I = I_{ph} - I_{s1} \cdot \left(e^{\frac{q(V+I.R_s)}{n_1.K.T}} - 1 \right) - I_{s2} \cdot \left(e^{\frac{q(V+I.R_s)}{n_2.K.T}} - 1 \right) - \frac{V+I.R_s}{R_p} \quad (\text{II.7})$$

Où :

- I et V : Courant et tension de sortie de la cellule photovoltaïque ;
- I_{ph} : Photo-courant produit ;
- I_{s1} et I_{s2} : Courants de saturation des diodes ;
- n_1 et n_2 : Facteurs de pureté de la diode ;
- R_s et R_p : Respectivement la résistance série et la résistance parallèle ;
- T : Température absolue en Kelvin ;
- q : Charge élémentaire constante ($1.602 \cdot 10^{-19}$ C) ;
- K : Constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}$ J/k) ;
- Le photo-courant I_{phmax} est atteint à une insolation maximale, souvent on a ($I_{ph} = S \cdot I_{phmax}$) avec S : c'est le pourcentage d'insolation.

Il est évident de l'équation (II.7), que la caractéristique courant-tension dépend fortement de l'insolation et de la température. La dépendance de la température est encore amplifiée par

les propriétés du photo-courant et les courants de saturation inverse des diodes qui sont donnés par :

$$I_{ph}(T) = I_{ph(T=298)} \cdot (1 + (T - 298) \cdot (5.10^{-4})) \quad (\text{II.8})$$

$$I_{s1} = K_1 \cdot T^3 \cdot e^{\frac{-E_g}{K.T}} \quad (\text{II.9})$$

$$I_{s2} = K_2 \cdot T^3 \cdot e^{\frac{-E_g}{K.T}} \quad (\text{II.10})$$

Où E_g : Est la bande d'énergie du semi-conducteur et :

$$K1 = 1.2 \text{ A/cm}^2 \cdot k^3 \quad (\text{II.11})$$

$$K2 = 2.9 \text{ A/cm}^2 \cdot k^{5/2} \quad (\text{II.12})$$

II.4. Simulation et interprétation des courbes

On considère le modèle de circuit équivalent (figure (II.2)) mène à l'équation (II.13) pour une rangée photovoltaïque de cellules (généralement considérée comme un panneau solaire) avec z cellules photovoltaïques raccordées en série [2]

$$I = I_{ph} - I_{s1} \cdot \left(e^{\frac{q(V+z.I.R_s)}{z.n1.K.T}} - 1 \right) - I_{s2} \cdot \left(e^{\frac{q(V+z.I.R_s)}{z.n2.K.T}} - 1 \right) - \frac{V+z.I.R_s}{z.R_p} \quad (\text{II.13})$$

Pour relever les caractéristiques (tension – courant) et (tension – puissance) on a utilisé la procédure suivante.

II.4.1 Programmation sous Matlab

L'équation (II.13) est non linéaire pour la résoudre on utilise une méthode numérique (Newton - Raphson).

a) Description de la méthode

La méthode de Newton- Raphson est une méthode itérative de recherche des racines d'une équation.

Elle se base sur les valeurs de la fonction et de sa dérivée. Une valeur arbitraire initiale X_0 est transformée, à l'itération n , suivant l'algorithme :

$$x_{n+1} = x_n - (f(x_n)/f'(x_n)) \quad (\text{II.14})$$

Jusqu'à que la précision souhaitée sur la racine soit obtenue. En pratique, on évalue cette précision en calculant la différence $x_{n+1} - x_n$ (on arrête notre algorithme si $|x_{n+1} - x_n| \leq \epsilon$).

Dans notre cas ($x = I$) :

$$f(I) = I_{ph} - I_{s1} \cdot \left(e^{\frac{q(V+z.I.R_s)}{z.n1.K.T}} - 1 \right) - I_{s2} \cdot \left(e^{\frac{q(V+z.I.R_s)}{z.n2.K.T}} - 1 \right) - \frac{V+z.I.R_s}{z.R_p} = 0 \quad (\text{II.14})$$

$$f'(x = I) = -I_{s1} \cdot \frac{q.R_s}{n1.K.T} \cdot e^{\frac{q(V+z.I.R_s)}{z.n1.K.T}} - I_{s2} \cdot \frac{q.R_s}{n2.K.T} \cdot e^{\frac{q(V+z.I.R_s)}{z.n2.K.T}} - \frac{R_s}{R_p} \quad (\text{II.15})$$

$$\text{Donc : } I_{n+1} = I_n - (f(I_n)/f'(I_n)) \quad (\text{II.16})$$

b) Réalisation de L'organigramme de la méthode

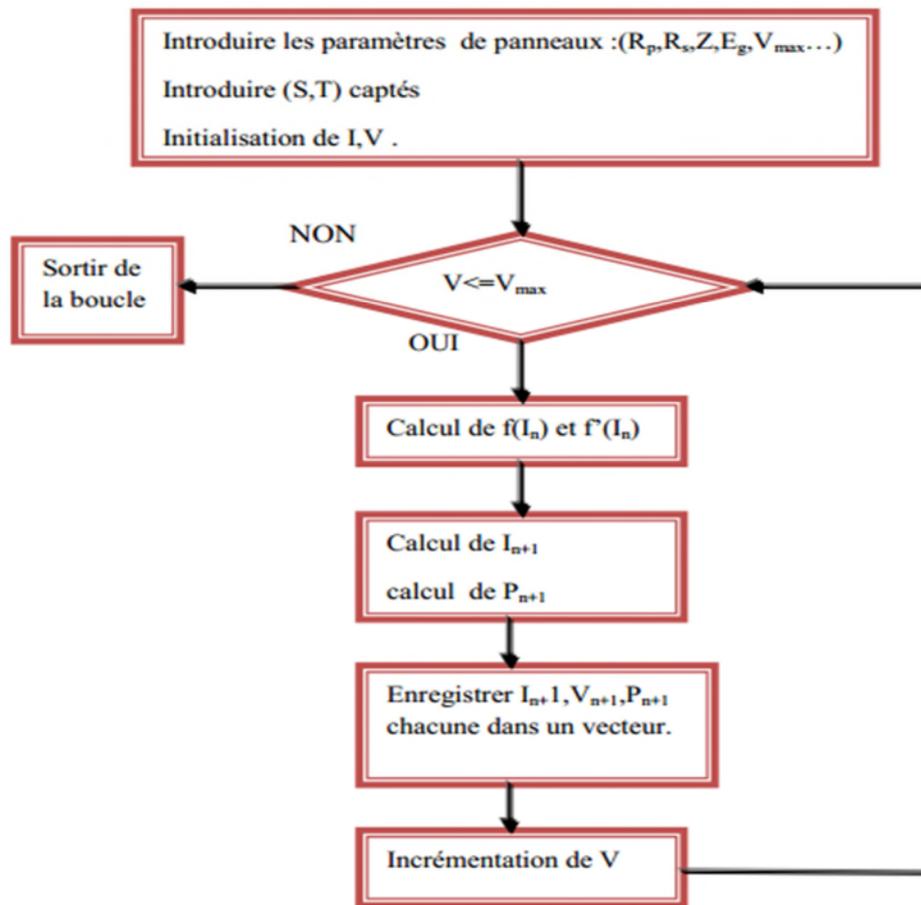


Figure II.3 Organigramme de la méthode

II.4.2 Matlab/simulink

Nous avons utilisé Matlab version 2009 dans notre travail de simulation. Le schéma bloc est fourni selon la figure II.4.

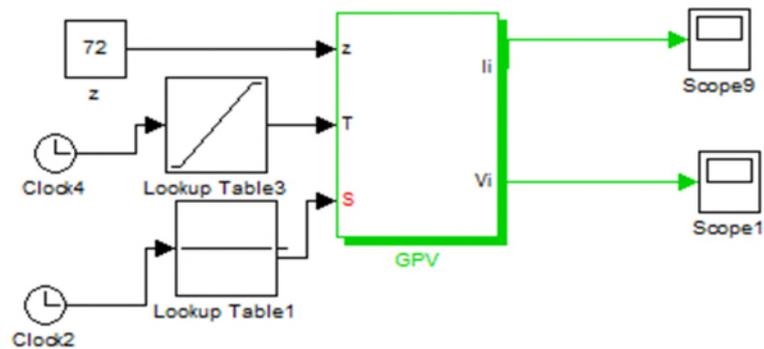


Figure II.4. Bloc simulink de GPV

II.4.3 Résultats et interprétation des courbes

a) Influence de l'ensoleillement

Une température de 25 °C est maintenue constante. L'ensoleillement S varie. Les courbes obtenues sont illustrées sur les figures (II.5 ; II.6).

A partir des résultats de simulation on remarque que :

- Influence due à la baisse de l'éclairement fait diminuer fortement la valeur du courant de court-circuit. Par contre la tension de circuit ouvert V_{CO} diminue faiblement ;
- Le point de puissance optimale chute brusquement si l'ensoleillement diminue ;
- Le courant produit par la photopile I_{ph} est pratiquement proportionnel à l'éclairement solaire S . Par contre, la tension V aux bornes de la jonction varie peu car elle est fonction de la différence de potentiel à la jonction N-P du matériau lui-même ;
- La tension de circuit ouvert ne diminuera que légèrement avec l'éclairement. Ceci implique donc que :
 - La puissance optimale de la cellule (P_m) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement.
 - Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension.

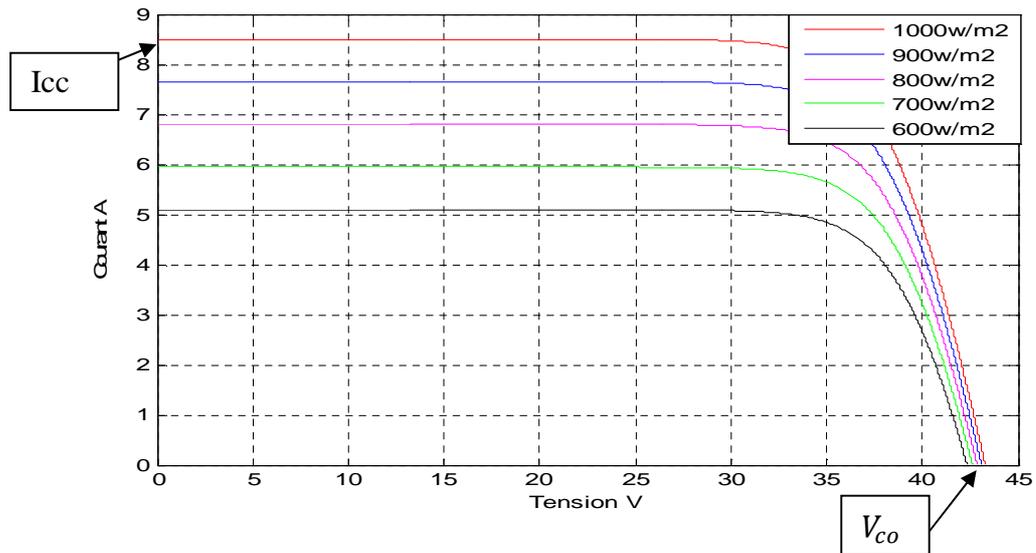


Figure II.5 Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $I=f(V)$

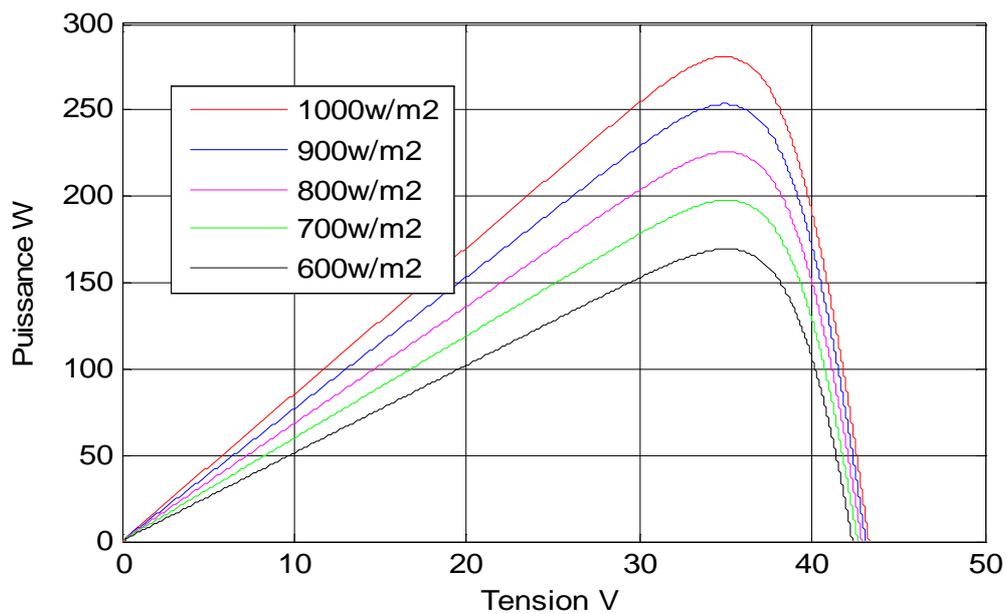


Figure II.6 Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $P=f(V)$

b) Influence de la température

Pour un ensoleillement maintenu de 1 kW/m² (100 %) constant, nous varions la température.

Les figures (II.7;II.8) représentent les résultats de notre simulation obtenue pour des températures de : 25 °C, 35°C, 45 °C, 55 °C et 65 °C.

a partir des figures on remarque que :

- I_{CC} : est faiblement dépendant de la température alors que V_{CO} est très sensible à la variation de la température ;
- L'augmentation de la puissance optimale va dans le sens inverse de T .

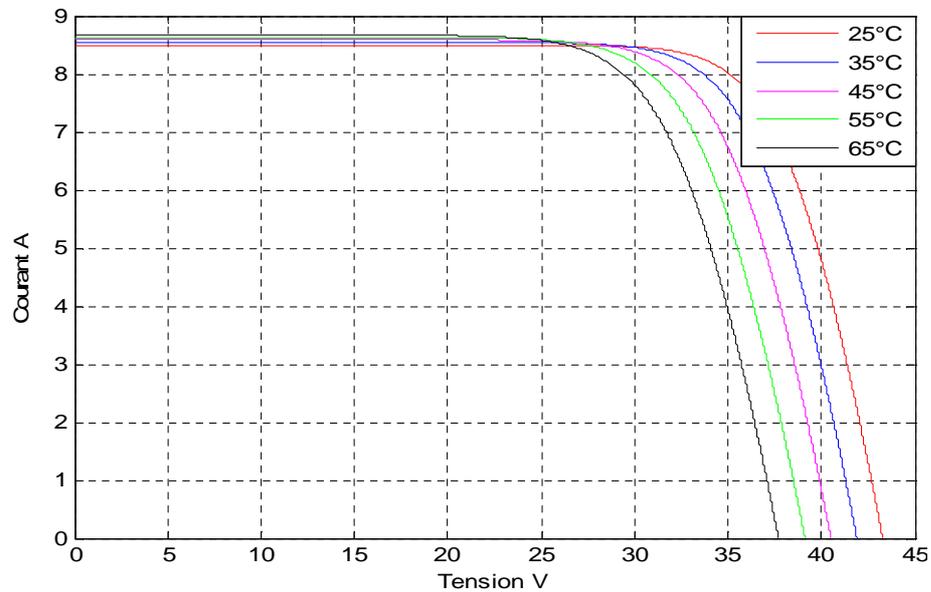


Figure II.7 Influence de la température sur la caractéristique $I = f(V)$

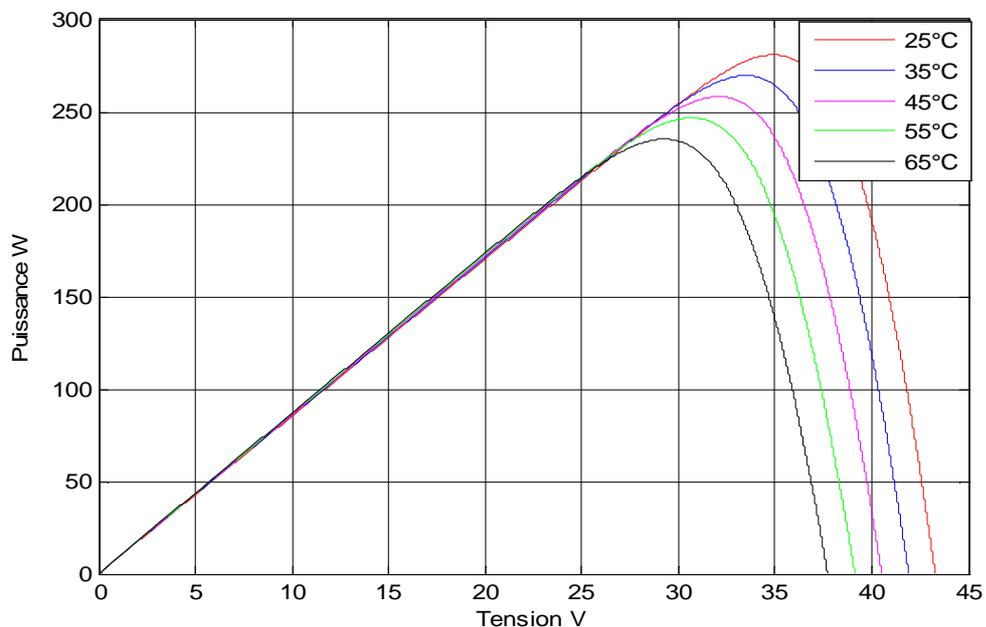


Figure II.8 Influence de la température sur la caractéristique $P = f(V)$

II.4.4 Conclusion

La température n'influe pas considérablement sur les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ du module solaire, on peut la supposer constante et égale à sa valeur de référence ($T_{ref}=25^{\circ}\text{C}$).

L'influence significative sur les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ du module demeure liée à l'éclairement.

II.5 Optimisation de point de puissance maximale

II.5.1 Synthèse des différentes techniques de maximisation de la puissance

Dans un système électrique comprenant une source et une charge, la recherche du point de fonctionnement optimal par des techniques d'optimisation représente ce qui est le plus important. Dans le cas du photovoltaïque, cette démarche est plus complexe du fait que la caractéristique des cellules dépend fortement de l'ensoleillement et de la température ambiante, entre autres. Il faut trouver un dispositif permettant de fonctionner à tout moment suivant le point de fonctionnement optimal. Ces dernières années plusieurs dispositifs ont été développés, aussi élaborés les uns que les autres. Dans la référence [33], les auteurs passent en revue les différentes méthodes de maximisation de puissance classées en deux catégories : les méthodes indirectes et les méthodes directes.

Parmi les méthodes directes on trouve : la méthode P&O (perturbation et observation), qui nous avons choisi.

II.5.2 Description de la méthode

La méthode Perturbation & Observation (P&O) est l'une des méthodes les plus utilisées.

C'est une méthode itérative permettant d'obtenir le MPP: on mesure les caractéristiques du panneau PV puis on induit une petite perturbation sur la tension (ou le courant) afin d'analyser la variation de puissance qui en résulte. Comme indiqué précédemment, le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension V_{PV} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{PV} qui en résulte. Ainsi, comme l'illustre la figure II.9, on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{PV} engendre un accroissement de la puissance P_{PV} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à

Chapitre II Modélisation et simulation des sources d'énergies

gauche du MPP. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a déjà dépassé le MPP. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P_{PV}(V_{PV})$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié.

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM.

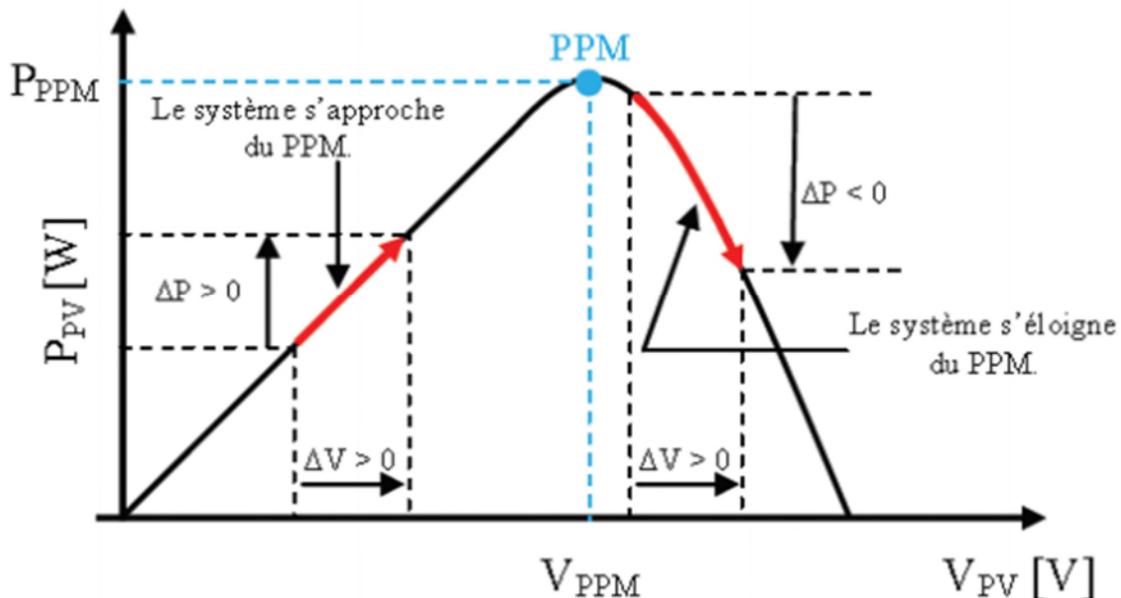


Figure II.9 Caractéristique $P_{PV}(V_{PV})$ d'un panneau photovoltaïque [26]

La figure II.10 représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (mesurant le courant et la tension des panneaux PV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant.

La méthode P&O est aujourd'hui largement utilisée de part de sa facilité d'implémentation.

Cependant, elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi, car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM. Ces

Chapitre II Modélisation et simulation des sources d'énergies

oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d'incrément ralentit la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis entre la précision et la rapidité, ce qui rend cette commande difficile à optimiser.

Il est connu que ce type de commande permet d'obtenir un rendement plus important durant une journée relativement ensoleillée, où le PPM évolue lentement et proportionnellement avec le soleil. Par contre, pour une journée avec de forts et fréquents changements d'irradiations, cette commande présente beaucoup plus de pertes, en raison du temps de réponse de la commande pour atteindre le nouveau PPM.

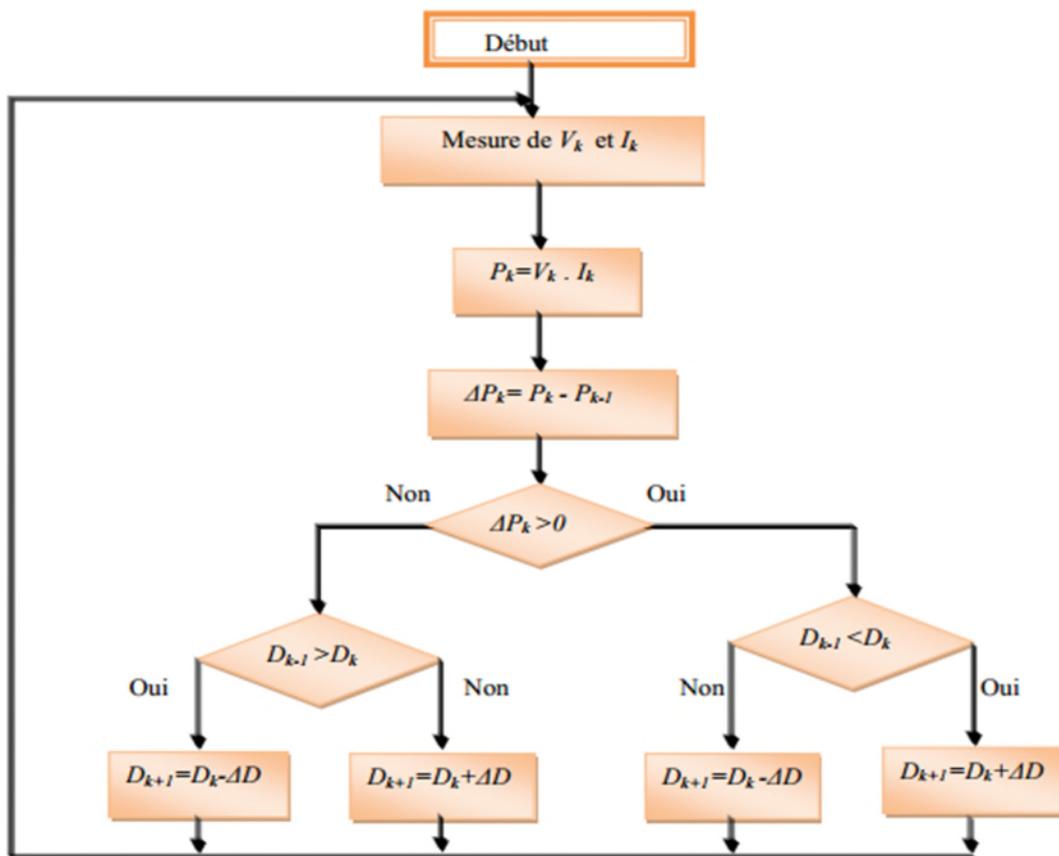


Figure II.10 Organigramme de la méthode perturbation et observation

Si on analyse en détail ce mode de recherche, il présente des erreurs d'interprétation au niveau de la direction à suivre pour atteindre le MPP lorsque des variations brusques des

conditions climatiques et/ou de charge apparaissent, comme cela est décrit sur la figure II.11.

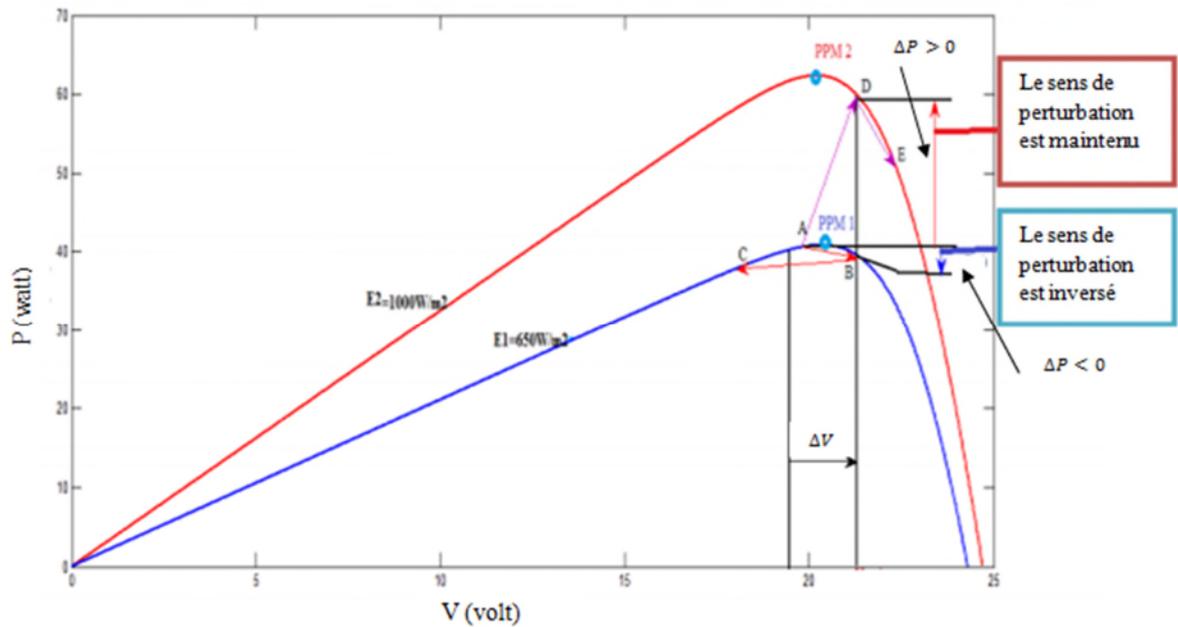


Figure II.11 Divergence de la commande P&O lors de variations d'irradiation. (Les deux courbes sont relevées pour le modèle de deux diodes précédant)

II.6 Modèle d'un hacheur survolteur (Boost)

Augmenter la tension d'une source, revient à utiliser le hacheur parallèle de type BOOST, appelé également hacheur survolteur dont le schéma de fonctionnement est représenté à la figure (II.12). Ce convertisseur continu-continu de l'électronique de puissance permet d'adapter la tension aux bornes du panneau PV pour atteindre le point de fonctionnement maximal.

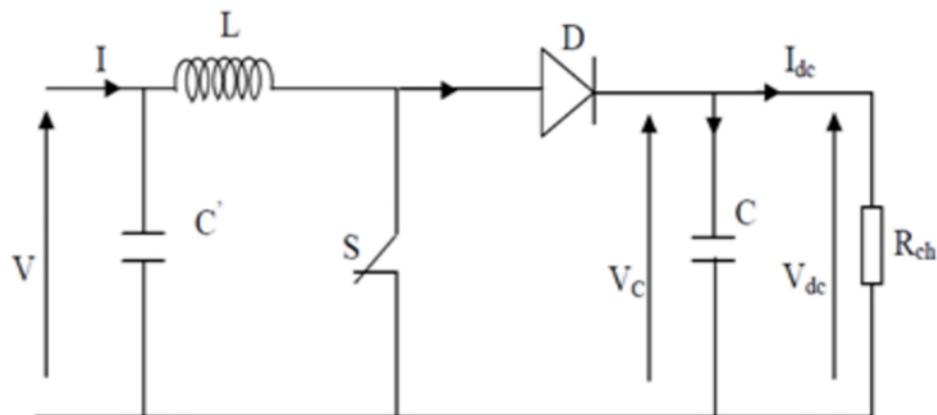


Figure II.12 Circuit électrique du convertisseur DC-DC

Chapitre II Modélisation et simulation des sources d'énergies

Les figures (II.13), (II.14) montrent le cycle de fonctionnement, de période de hachage T , qui comporte deux étapes. Lors de la première, on rend l'interrupteur passant et la diode polarisée en inverse, donc bloquée. Cette phase dure de 0 à $\alpha \cdot T$ (α rapport cyclique, est compris entre 0 et 1)

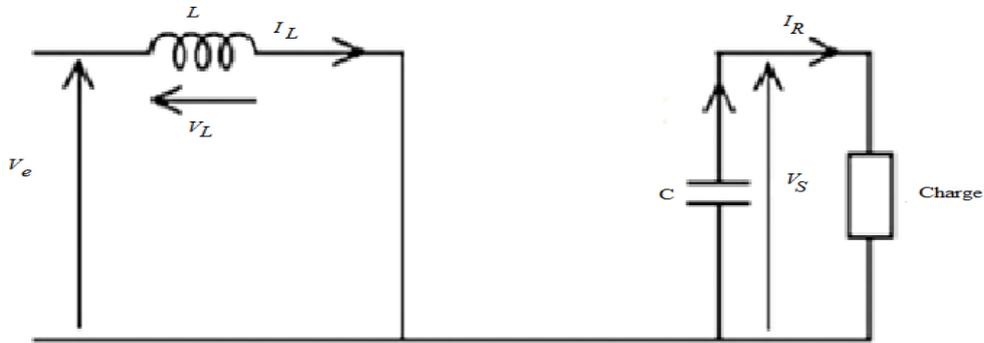


Figure II.13 Schéma d'un Hacheur survolteur à $t \in [0, \alpha \cdot T]$

Le condensateur C supposé initialement chargé, fournit de l'énergie à la charge et un courant I_R circule dans cette dernière.

$$\begin{cases} V_L = -V_e = L \frac{dI_L}{dt} \\ V_s = R \cdot I_R \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

Lors de la seconde période, on bloque l'interrupteur. La diode devient passante. Cette phase dure de $\alpha \cdot T$ à T .

Avec : $I_c = I_R$

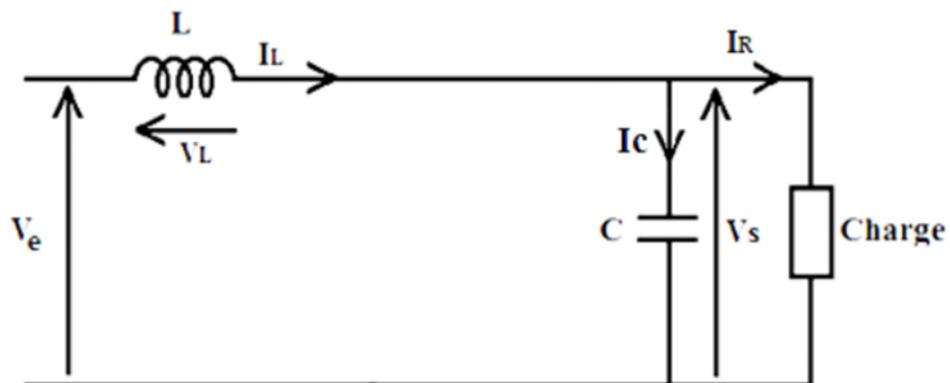


Figure II.14 Schéma d'un Hacheur survolteur à $t \in [\alpha \cdot T, T]$

$$\begin{cases} V_L = V_e - V_s \\ I_c = I_L - I_R \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

On déduit facilement la tension et l'intensité dans la charge par les équations suivantes:

$$\begin{cases} V_s = \frac{1}{1-\alpha} \cdot V_e \\ I_R = (1-\alpha) \cdot I_L \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

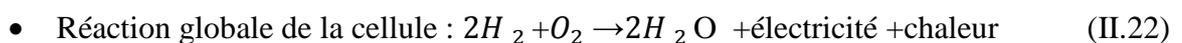
II.7 Modélisation D'une pile à combustible type PEMFC

II.7.1 Introduction

La construction d'un modèle dépend de l'utilisation à laquelle il est destiné : un modèle peut servir à concevoir, comprendre, prévoir ou commander. Il peut s'appuyer sur des lois physiques ou sur des données collectées expérimentalement. Si le but est de comprendre et de prévoir le comportement d'un système, on aura recours à un modèle de connaissance, celui-ci présentant un domaine de validité plus étendu que celui d'un modèle de représentation. Etablir un modèle de connaissance, c'est décrire un processus de manière scientifique et quantitative. Les mathématiques permettent cette transcription quantitative des problèmes physiques et offrent de nombreux outils pour résoudre les problèmes, partiellement ou complètement. On ramène ensuite la solution dans son contexte d'origine. Cette description du processus permet d'en étudier l'évolution, d'en simuler les variantes, et en modifiant certains paramètres [19].

II.7.2 Modèle électrochimique de la pile à combustible PEMFC [18]

Le principe de fonctionnement de la pile à combustible est basé sur le processus inverse de l'électrolyse de l'eau, connu depuis 1802 après une découverte concrétisée par Sir Henry DAVID. Une réaction d'oxydoréduction (en présence de platine) fait réagir l'hydrogène et l'oxygène pour produire de l'électricité, de l'eau et de la chaleur selon les équations (II.20, II.21, II.22) des réactions électrochimiques se produisant aux électrodes d'une cellule PEMFC comme suit :



La potentielle thermodynamique théorique de la pile à combustible PEMFC H_2 / O_2 à 25°C et à 1 atm est de l'ordre de 1,23 V, mais le potentiel réel (EPAC) de la cellule décroît par rapport à la potentielle thermodynamique d'équilibre quand le courant débite, cette

Chapitre II Modélisation et simulation des sources d'énergies

déviations à la valeur du potentiel de Nernst, est due aux pertes irréversibles appelées polarisations η (surtension). La polarisation d'activation, la polarisation ohmique et la polarisation de concentration.

Par conséquent, l'expression de la tension d'une cellule s'exprime comme suit (II.23):

$$E_{PAC} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (II.24)$$

Pour calculer la tension (E_S) de (n) piles unitaires reliées en série formant un assemblage

$$E_S = n \times E_{pac} \quad (II.25)$$

Dans le cas où l'eau liquide serait le produit de la PEMFC l'expression de l'équation de Nernst (II.26) arrangé avec un calcul numérique se présente comme suit :

$$E_{Nernst} = 1,229 - 0,85T^{-3} \cdot (T-298,15) + 4,31 \cdot 10^{-5} \cdot T \cdot [\ln(P_{H_2}^*) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2}^*)] \quad (II.26)$$

Où T est la température opératoire absolue de la pile en Kelvin (K), $P_{H_2}^*$ et $P_{O_2}^*$ sont les pressions partielles à l'interface respectivement de l'hydrogène et de l'oxygène (atm).

II.7.2.1 Perte d'activation

Les pertes d'activations sont dues au démarrage des réactions chimiques à l'anode et à la cathode. Une partie de l'énergie disponible est utilisée pour briser et reformer les liaisons chimiques aux électrodes. Si ces pertes interviennent aux deux électrodes, la réaction d'oxydation de l'hydrogène à l'anode est beaucoup plus rapide que la réduction de l'oxygène à la cathode [27].

Il s'ensuit que les pertes d'activations sont essentiellement dûes aux réactions cathodiques.

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

$$V_{act} = \xi_1 + \xi_2 T + \xi_3 T \ln(C_{O_2}^*) + \xi_4 T \ln(I_{PAC}) \quad (II.27)$$

Où : I_{PAC} est le courant de fonctionnement de la pile et ξ_1 , ξ_2 , ξ_3 et ξ_4 sont des coefficients paramétriques appropriés à chaque modèle physique de la pile à combustible PEMFC.

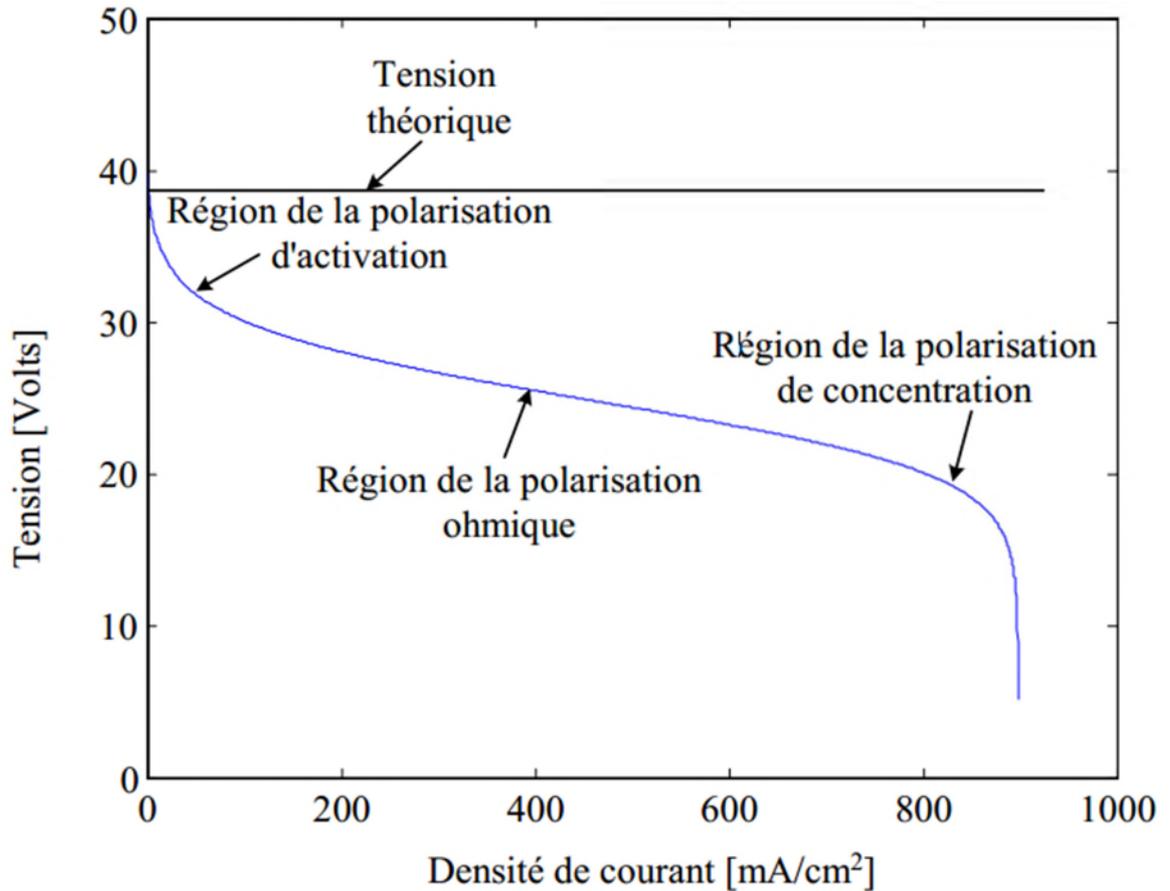


Figure II.15 Courbe tension-courant typique d'une pile à combustible

$C_{O_2}^*$: Représente les concentrations de l'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 exprimée en fonction de sa pression par la loi de Henry.

$$C_{O_2}^* = \frac{P_{O_2}^*}{5.08 \times 10^6 \times e^{-\left(\frac{498}{T}\right)}} \quad (\text{II.28})$$

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

$$P_{O_2}^* = P_{cath} \times (1 - X_{H_2O}^{sat}) \quad (\text{II.29})$$

P_{cath} : Est 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 supposée \approx à 50 %, on obtient alors:

$$P_{O_2}^* = \frac{1}{2} \times P_{cath} \quad (\text{II.30})$$

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

$$P_{H_2}^* = P_{anode} \times \left(1 - \frac{1}{2} \times X_{H_2O}^{sat}\right) \quad (\text{II.31})$$

P_{anode} Est la pression de l'hydrogène à l'anode, et $X_{H_2O}^{sat} = 0.5$.

II.7.2.2 Perte ohmique [27]

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:

$$V_{ohm} = I_{PAC} \times (R_M + R_C) \quad (\text{II.32})$$

R_C : Est la résistance équivalente de contact à la conduction des électrons ;

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

$$R_M = \frac{l \times r_M}{A} \quad (\text{II.33})$$

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

$$r_M = \frac{181.6 \times \left[1 + 0.03 \times \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right) + 0.062 \times \left(\frac{T}{303} \right)^2 \times \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right)^{2.5} \right]}{\left[\lambda_{\text{H}_2\text{O}/\text{SO}_3^-} - 0.634 - 3 \times \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right) \right] \times \exp \left[4.18 \times \left(\frac{T-303}{T} \right) \right]} \quad (\text{II.34})$$

Le terme $\frac{181.6}{(\lambda_{\text{H}_2\text{O}/\text{SO}_3^-} - 0.634)}$ représente la résistance spécifique de la membrane ($\Omega \cdot \text{cm}$) à $I_{pac} = 0$ et à une température de 30°C ($T = 303 \text{ K}$). Le terme exponentiel au dénominateur est le facteur de correction de la température si cette dernière n'est pas à 30°C .

- $\lambda_{\text{H}_2\text{O}/\text{SO}_3^-}$: Est la 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^2).

En remplaçant les relations (II.33) et (II.34) dans l'équation (II.32), l'expression de la polarisation ohmique devient:

$$V_{hom} = \frac{I_{PAC}}{A} \left[\frac{181.6 \times \left[1 + 0.03 \times \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right) + 0.062 \times \left(\frac{T}{303} \right)^2 \times \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right)^{2.5} \right]}{\left[\lambda_{\text{H}_2\text{O}/\text{SO}_3^-} - 0.634 - 3 \times \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right) \right] \times \exp \left[4.18 \times \left(\frac{T-303}{T} \right) \right]} \times I + A \times R_C \right] \quad (\text{II.35})$$

II.7.2.3 Perte de concentration

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

$$V_{conc} = -B \left(1 - \frac{J}{J_{max}}\right) \quad (\text{II.36})$$

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

$$E_s = n \times E_{pac} \quad (\text{II.37})$$

On remplace les expressions des pertes dans l'équation (II.24), et on obtient le potentiel réel global de la pile à combustible PEMFC, par l'équation suivante [II.38]:

$$E_{PAC} = 0.2817 - 0.85 \times 10^{-3}(T - 298.15) + 4.3081 \times T \left[\ln\left(\frac{3}{4}P_{anode}\right) + \frac{1}{2} \ln\left(\frac{1}{2}P_{cath}\right) \right] +$$

$$\left[2.86 \times 10^{-3} + 2 \times 10^{-4} \ln(A) + 4.3 \times 10^{-5} \ln\left(\frac{0.75P_{anode}}{1.091 \times 10^6 \times \exp\left(\frac{77}{T}\right)}\right) \right] \times T$$

$$+ 7.6 \times 10^{-5} \ln\left(\frac{0.5P_{cath}}{5.08 \times 10^6 \times \exp\left(\frac{-498}{T}\right)}\right) - 1.93 \times 10^{-4} T \times \ln(I_{PAC}) -$$

$$I_{PAC} \left[\frac{1.816 \times \left[1 + 0.03 \times \left(\frac{I_{PAC}}{A}\right) + 0.062 \times \left(\frac{T}{303}\right)^2 \times \left(\frac{I_{PAC}}{A}\right)^{2.5} \right]}{A \left[\lambda_{H_2O}/SO_3^- - 0.0634 - 3 \times \left(\frac{I_{PAC}}{A}\right) \right] \times \exp\left[4.18 \times \left(\frac{T-303}{T}\right)\right]} \right] l + R_C \right] + B \left(1 + \frac{J}{J_{max}}\right) \quad (\text{II.38})$$

II.7.3 Résultats de simulation

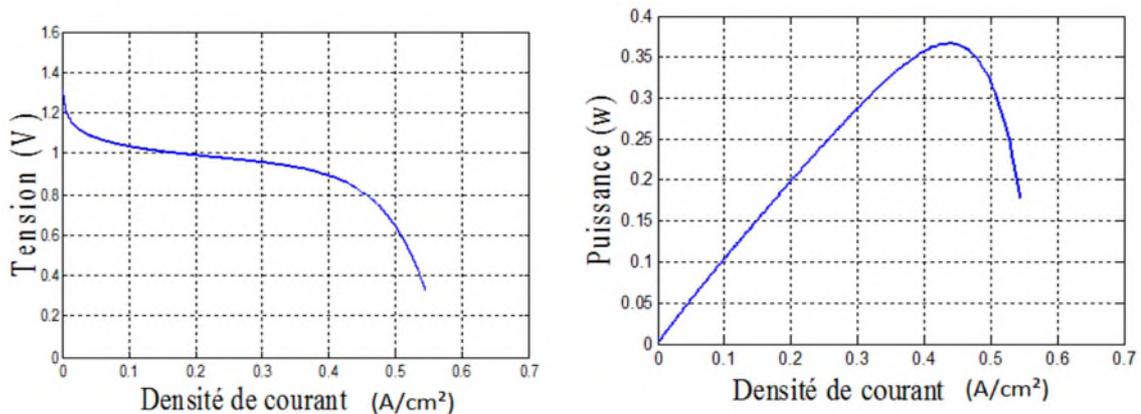


Figure II.16 Caractéristique $V_{pac}(I_{pac})$ et $P_{pac}(I_{pac})$ à $T=25^\circ\text{C}$

II.8 Modélisation de la batterie [28]

Pour un accumulateur électrochimique (plomb-acide), une mise en œuvre du modèle de CIEMAT nous montre comment s'affranchir des effets néfastes de l'imprécision sur la connaissance et les fluctuations de la résistance interne de la batterie, ce modèle est basé sur le schéma électrique de la figure (II.17).

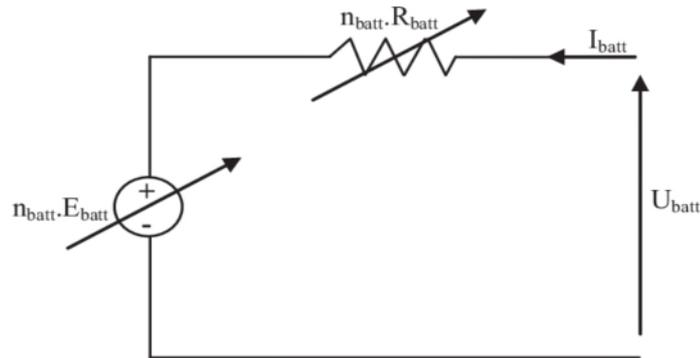


Figure. II.17 Schéma équivalent de la batterie CIEMAT [28]

La batterie est alors décrite seulement par deux éléments, dont les caractéristiques dépendent d'un certain nombre de paramètres ; tension à vide E_b et sa résistance interne R_b .

$$V_{bat} = n_b E_b \pm n_b R_b I_{bat} \quad (\text{II.39})$$

Où V_{bat} et I_{bat} sont la tension et le courant de la batterie et n_b est le nombre des cellules en série.

II.8.1 Modèle de la capacité

Le modèle de la capacité C_{batt} donne la quantité d'énergie que peut restituer la batterie en fonction du courant moyen de décharge $I_{bat,moy}$. Cette capacité est donnée par l'eq (II.40).

$$C_{bat} = \frac{1.67 C_{10}}{1 + 0.67 \left(\frac{I_{bat,moy}}{I_{10}} \right)^{0.9}} \times (1 + 0.005 \times \Delta T) \quad (\text{II.40})$$

I_{10} : Courant nominal de la batterie (en A) donné par le constructeur ;

C_{10} : Capacité nominale de la batterie (en Ah) en régime de décharge à courant constant durant 10 heures. Elle est donnée par le constructeur :

$$C_{10} = I_{10} \cdot 10 \quad (\text{II.41})$$

ΔT : Echauffement de la batterie par rapport à la température ambiante de 25°C. Il est supposé identique pour tous les éléments de la batterie.

La capacité C_{bat} sert de référence pour déterminer l'état de charge (EDC) de la batterie. Ce dernier sera formulé en fonction de la quantité de charge manquante à la batterie, Q_d .

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_{bat}} \quad (II.42)$$

Dont Q_d est calculé par la fonction suivante :

$$Q_d = I_{bat} \times t \quad (II.43)$$

Avec t : Durée de fonctionnement de la batterie avec un courant I_{bat} .

II.8.2 Equations de la tension de décharge

En régime de décharge, la f.e.m. et la résistance interne sont déterminées par (II.44) et (II.45)

$$E_{b_déch} = 1.965 + 0.12EDC \quad (II.44)$$

$$R_{b_déch} = \frac{1}{c_{10}} \left(\frac{4}{1+|I_{bat}|^{0.3}} + \frac{0.27}{EDC^{1.5}} \right) \quad (II.45)$$

D'où l'expression de la tension de la batterie, pour ce régime de décharge :

$$V_{bat_déch} = n_b E_{b_déch} - n_b R_{b_déch} |I_{bat}| \quad (II.46)$$

$$V_{bat_déch} = n[1.965 + 0.12EDC] - n \frac{1}{c_{10}} \left(\frac{4}{1+|I_{bat}|^{0.3}} + \frac{0.27}{EDC^{1.5}} + 0.02 \right) (1 - 0.007\Delta T) \quad (II.47)$$

II.8.3 Equations de la tension de charge

En régime de charge et avant l'apparition du phénomène de "Gassing" (dégagement gazeux d'hydrogène et d'oxygène), la f.e.m. et la résistance interne sont déterminées par (II.48) et (II.49)

$$E_{b_char} = 2 + 0.16EDC \quad (II.48)$$

$$R_{b_char} = \frac{1}{c_{10}} \left(\frac{4}{1+(I_{bat})^{0.3}} + \frac{0.27}{EDC^{1.5}} + 0.036 \right) (1 - 0.0025\Delta T) \quad (II.49)$$

D'où l'expression de la tension de la batterie avant la surcharge est :

$$V_{bat_char} = n_b E_b + n_b R_{b_char} \times I_{bat} \quad (II.50)$$

$$V_{bat_char} = n[2 + 0.16EDC] - \frac{1}{c_{10}} \left(\frac{4}{1+(I_{bat})^{0.3}} + \frac{0.27}{EDC^{1.5}} + 0.036 \right) (1 - 0.0025\Delta T) \quad (II.51)$$

II.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons modélisé les différents composants de système électrique hybride étudié, à savoir les sources d'énergie électrique notamment la PAC de type(PEMFC) et le générateur photovoltaïque, un système de stockage (batterie), et un convertisseur statique (hacheur-boost).

Dans le chapitre suivant nous étudierons la gestion d'énergie de système hybride complet, avec un dimensionnement des différents composants de système.

Chapitre III

Dimensionnement et gestion d'énergie

III.1 Introduction

Nous avons édifié dans le chapitre précédent la modélisation de chaque élément du système complet qui est constitué des panneaux photovoltaïques, pile à combustible et des batteries. Nous souhaitons satisfaire la demande de la charge, pour cela le dimensionnement des éléments du système est indispensable.

Dans ce chapitre nous allons aussi proposer un organigramme de gestion d'énergie du système étudié.

L'organigramme sera modélisés sur matlab-simulink et il sera introduit dans le système global de simulation, les résultats de simulation seront aussi présentés et discutés dans le chapitre suivant.

III.2 Démarche globale de dimensionnement

Le dimensionnement consiste à déterminer la taille et les caractéristiques des sous ensembles suivants: le panneau solaire approprié, les batteries appropriées, la pile à combustible, et les systèmes d'adaptation de l'énergie à placer entre les étages de production et de consommation. Une bonne gestion dans le système permet d'équilibre entre la puissance fournie et la puissance consommée. Nous devons donc chercher le meilleur compromis entre la production et la consommation.

III.3 Description de la station

Nous avons une station multi sources à énergie renouvelable située dans un site isolé (autonome), destinée pour le chargement des différents véhicules électriques et hybrides (une station public).

Elle constituée d'un :

- Système photovoltaïque avec stockage (batteries de type plomb acide) ;
- D'une pile à combustible type PEMFC ;
- Un réservoir d'hydrogène ;
- Bornes de recharge.

On considère la source d'énergie photovoltaïque comme une source principale pour satisfaire au maximum la puissance demandée par la charge, et la pile à combustible

Chapitre III Dimensionnement et gestion d'énergie

comme une source d'énergie secondaire, cette dernière est alimentée directement par un réservoir d'hydrogène comprimé de 700 bars.

Il existe deux principales familles de bornes de recharge ouvertes au public [29] :

- Les bornes de recharge normale, et accélérée qui délivrent du courant alternatif. Pour ces bornes, il est recommandé que l'utilisateur se branche avec son propre câble.
- Les bornes de recharge rapide (en courant alternatif ou bien en courant continu). Ces bornes disposent des câbles que les utilisateurs branchent sur la prise de leur véhicule. Les chargeurs rapides pour véhicules électrique recourent à la charge en DC et convertissent le courant avant qu'il rentre dans le véhicule. Une fois la conversion finie, le courant entre directement dans la batterie sans passer par le convertisseur du véhicule.

Les types et le temps de recharge sont récapitulés dans le tableau (III.1) suivant :

Tableau (III.1) Temps faut-il pour le chargement d'un véhicule [30]

Durée de recharge	Alimentation	Tension	Courant maximum
6 - 8 h	Monophasée 3,3 kW	230 VAC	16 A
2 - 3 h	Triphasée 10 kW	400 VAC	16 A
3 - 4 h	Monophasée 7 kW	230 VAC	32 A
1 - 2 h	Triphasée 24 kW	400 VAC	32 A
20 - 30 mn	Triphasée 43 kW	400 VAC	63 A
20 - 30 mn	Continue 50 kW	400-500 VDC	100-125 A

III.4 Dimensionnement de la charge

Dans ce mémoire, nous traitons le cas de chargement de 04 véhicules différents en parallèle.

Chapitre III Dimensionnement et gestion d'énergie

Nous avons estimé la charge moyenne des véhicules électrique à 30 KW, et 20 KW pour les véhicules hybrides, 5KW pour les autres charges dérivatives. Nous fixons à 100KW la limite supérieure pour la puissance électrique demandée par la charge.

Le tableau suivant définit la puissance totale demandée par la charge supposée :

Tableau (III.2) Puissance totale estimée par la charge

Type de charge	Puissance [KW]	nombre	Puissance totale demandée [KW]
Véhicules électriques	30	2	60
Véhicules hybrides	17.5	2	35
Autres charges dérivatives	5	/	5
			100

Voici quelques exemples sur les différentes charges supposées (véhicules électriques, hybrides et les autres charges dérivatives) :

La voiture électrique est animée par un moteur électrique alimenté par une batterie de grande capacité, son autonomie moyenne et réelle varie entre 110 à 170 Km et en fonction du style de conduite, du type de parcours et de l'utilisation des auxiliaires (chauffage et climatisation). Selon les modèles, le temps de recharge oscille entre 30 minutes (borne de recharge rapide publique) et 9 heures (prise domestique standard) [31].

Exemples de modèles : citadine BMW i3 et Renault ZOE, Nissan LEAF et Volkswagen.



Figure III.1 Voiture électrique : Volkswagen Golf [31]

Chapitre III Dimensionnement et gestion d'énergie

La voiture hybride est animée par une double motorisation combinant un moteur thermique (essence le plus souvent ou diesel) et un ou plusieurs moteurs électriques. La batterie est de petite capacité.

Exemples de modèles : Honda jazz hybride et Toyota Yaris HSD Citroën DS5 hybride 4, Ford, Peugeot 3008.



Figure III.2 Voiture hybride : Renault [31]

La voiture hybride rechargeable est également dotée d'une double motorisation mais intègre une batterie de plus grande capacité qui, contrairement à l'hybride classique, se recharge via une source d'énergie externe (prise domestique ou borne de recharge, de 2 à 4 heures). Son autonomie moyenne et réelle en mode 100% électrique oscille entre 20 et 45 Km (jusqu'à la vitesse maximale de 130 Km/h) [31].

Exemples de modèles : Audi A3, Volkswagen Golf GTE, Toyota Prius.



Figure III.3 Voiture hybride rechargeable : Toyota Prius [31]

Chapitre III Dimensionnement et gestion d'énergie

Autres charges dérivatives : les charges dérivatives, destinée à l'alimentation de la station ainsi (les lampes, les éclairages et les ordinateurs... etc.), est estimée à une puissance maximale de 5 kw.

III.5 Dimensionnement des sources d'énergies

Avant toutes études d'un système, le dimensionnement de ses composants reste une étape déterminante afin d'assurer un bon fonctionnement durant toute la période d'utilisation. Pour cela, le choix des composants devra être effectué suivant une méthodologie bien précise.

III.5.1 Dimensionnement des générateurs photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque utilisé caractérisé par :

- Puissance maximale d'un panneau PV: 280 Wc ;
- Courant au point de puissance max : 8.06 A ;
- Tension au point de puissance max : 34.8 V ;
- Courant de court circuit : 8.5 A ;
- Tension de court circuit : 43.3 V ;
- Surface unitaire : 1956×992 cm.



Module photovoltaïque Monocristallin 280Wc
Produits > Modules photovoltaïques Mono ELYSUN > 280Wc

Une large gamme d'applications

Une durée de vie accrue

- » Cellules encrées dans l'EVA (Ethylène Vinyle Acétate)
- » Vitrage de protection sur la face avant
- » Face arrière résistante à l'eau et aux conditions climatiques
- » Modules équipés de diodes By-Pass - 3 diodes

Un encadrement résistant

- » Encadrement entièrement en d'aluminium
- » Cadre vissé de chaque cotés

Une installation simple

- » Prise facilement connectable

Une finition de qualité

- » Optique, mécanique et module électrique testés pendant et post-production
- » Production automatisée assurant une haute qualité de production

Garanties & Certificats

- » 12 ans de garantie pour un rendement de 90%
- » 25 ans de garantie pour un rendement de 80%
- » 10 ans de garantie matérielle
- » IEC 61215, IEC 61730, TÜV Safety Class II, CE, ISO, RoHS, MCS, BRE Global Listed, PV Cycle, ISO, UL, Clean Energy Council Member, Bankable

Modèle en Full Black disponible



IEC ISO TÜV CE

Fiche technique PDF

Figure III.4 Fiche technique de panneau photovoltaïque utilisé [32]

Chapitre III Dimensionnement et gestion d'énergie

Le dimensionnement ayant une incidence sur le prix, la qualité et la pérennité du système PV en site isolé, il constitue donc une étape cruciale lors de la mise en place du système. Il dépend :

- De l'ensoleillement sur le site au cours de l'année ;
- De l'énergie requise par chaque récepteur à alimenter ;
- Du rendement énergétique de l'ensemble des composants y compris le stockage ;
- Il est alors évident qu'une demande importante en énergie augmentera la taille et le coût du système tandis que le choix de composants à haut rendement énergétique permettra de les réduire.

D'une manière générale, le dimensionnement devra suivre les étapes suivantes :

- Evaluation des besoins énergétiques ;
- Estimation de l'ensoleillement ;
- Dimensionnement des panneaux PV ;
- Dimensionnement du stockage ;
- Dimensionnement des convertisseurs.

a) Détermination de la taille de générateur photovoltaïque

Le nombre des panneaux N_{pv} est calculé par la relation suivante :

$$N_{pv} = \frac{P_{pv}}{P_c} \quad (\text{III.1})$$

P_{pv} : Puissance produite par le générateur photovoltaïque ;

P_c : Puissance crête d'un panneau photovoltaïque ;

$$N_{pv} = \frac{P_{pv}}{P_c} = \frac{100 \times 10^3 [W]}{280 [W]} = 360 \text{ panneaux.}$$

b) Détermination de la surface totale à installée par les panneaux photovoltaïque

$$S_{totale} = N_{pv} \times S_u \quad (\text{III.2})$$

S_u : Surface unitaire d'un panneau photovoltaïque [m²].

Chapitre III Dimensionnement et gestion d'énergie

$$S_{totale} = 360 \times 1.95 = 720 \text{ [m}^2\text{]}$$

La tension du bus continu est fixée à 500V, nous souhaitons avoir une tension de 210 V à la sortie de générateur photovoltaïque, afin de l'élevée à celle du bus continu on à besoin d'un convertisseur hacheur (boost).

Le nombre des panneaux en série et en parallèle, est calculés par les relations (III.3), (III.4) suivantes :

$$N_{pv,s} = \frac{V}{V_C} \quad (III.3)$$

$$N_{pv,p} = \frac{N_{pv}}{N_{pv,s}} \quad (III.4)$$

Donc : $N_{pv,s} = 6$ et $N_{pv,p} = 60$

$N_{pv,s}$: Nombre des panneaux en série ;

V : Tension de système photovoltaïque ;

V_C : Tension au point de puissance maximale ;

$N_{pv,p}$: Nombre des panneaux en parallèle.

III.5.2 Dimensionnement des batteries de stockage

Les batteries utilisées ayant les caractéristiques suivantes :

Tableau (III.3) Caractéristique de modèle de la batterie utilisée

12v400ah solaire batterie

point	12v400ah solaire batterie
marque Nom	ZD
modèle NO.	12V400AH
taille	561*170*220mm
tension nominale	12 V
Capacité nominale	400AH/10HR
Type PAS.	ZD-400AH
scellé Type	scellé
emballage	boîte intérieure-carton-palette-conteneur
Marché principal	afrique, moyen-orient, asie, Amérique du sud, Europe et en Amérique

Chapitre III Dimensionnement et gestion d'énergie

Le dimensionnement du stack des batteries requiert une attention particulière afin d'augmenter sa durée de vie et par la même occasion assurer l'autonomie du système et diminuer le coût global du système.

La capacité des batteries de stockage est déterminée à partir de la charge maximale demandée

$$C_{batt} = \frac{P_{ch} \times N_{jaut}}{V_{batt} \times DOD \times \eta_{batt}} \quad (III.5)$$

$$C_{batt} = \frac{100 \times 10^3 \times 12}{12.6 \times 0.6 \times 0.9} = 176.366 \text{ [KAh]}$$

Avec :

C_{batt} : Capacité des batteries [Ah];

P_{ch} : Puissance de charge [KW];

N_{jaut} : Nombre de jours d'autonomie [h];

V_{batt} : Tension de la batterie [V];

DOD : Profondeur de décharge [%];

η_{batt} : Rendement de la batterie [%].

Pour déterminer le nombre des batteries constituant le stack, nous avons sélectionné une batterie élémentaire ayant une capacité et une tension nominale de 400Ah et 12V.

Le nombre des batteries est décrit par la relation suivante :

$$N_{batt} = ENT \left[\frac{C_{batt}}{C_{batt,u}} \right] \quad (III.6)$$

$$N_{batt} = \frac{176.366 \times 10^3}{400} = 441 \text{ batteries}$$

Avec :

$C_{batt,u}$: Capacité unitaire de la batterie [Ah].

Nous avons fixé la tension des batteries à 192 V (dans les conditions optimales), donc on a besoin d'un convertisseur boost pour avoir élevé la tension jusqu'à 500 V, celle du bus continu.

A partir de la, on va déterminer la disposition des batteries en série et en parallèle.

$$N_{batt,s} = 16 \text{ Batteries}$$

$$N_{batt,p} = 28 \text{ Batteries}$$

$$\text{Donc : } N_{batt,new} = 448 \text{ Batteries}$$

On a augmenté le nombre des batteries pour des raisons de dimensionnement.

III.5.3 Dimensionnement de la pile à combustible type PEMFC

$$P_{PAC,max} = 100 \text{ [KW]}$$

$$U_{PAC} = 0.6 \text{ [V]}$$

$$j = 0.6 \text{ [A/cm}^2\text{]}$$

Nous avons donné la description des composants constituant la PAC. Le dimensionnement est reposé sur le choix de nombre de cellules élémentaires et la surface active de chacune d'elle.

Ces deux grandeurs dépendent, respectivement, de la tension de la pile et le courant débité et déterminent la quantité de puissance fournie. En effet, la puissance électrique brute de la pile est donnée par l'expression suivant :

$$P_{PAC} = N_{PAC} \times U_{PAC} \times j \times S_{PAC} \quad (\text{III.7})$$

Où P_{PAC} est la puissance fournie par la pile, U_{PAC} et I_{PAC} la tension et le courant de la pile respectivement, N_{cell} Est le nombre de cellules élémentaires formant la pile, U_{cell} la tension par cellule, j la densité de courant (A/cm²) et S_{PAC} la surface active d'une cellule. Une limite raisonnable, restant dans la zone linéaire ohmique de fonctionnement, est de 0.6A/cm² pour la densité de courant correspondant à une tension de cellule d'environ 0.6V.

La pile à combustible est connectée à un convertisseur statique qui doit générer une tension de bus de 500V. Comme le gain de ce convertisseur est limité à deux pour des raisons de rendement, il faut que la tension de pile soit au minimum de 250 V. Ce qui donne un nombre de cellule de :

$$N_{PAC} = \frac{U_{stach}}{U_{PAC}} = \frac{\frac{V_{bus}}{2}}{U_{PAC}} = ENT \left(\frac{250}{0.6} \right) + 1 = 417 \text{ cellules} \quad (\text{III.8})$$

V_{bus} : Tension du bus continue 500V ;

$$U_{stach} : \text{Tension du Stack en pleine charge } (U_{stach} = \frac{V_{bus}}{2}) ; \quad (\text{III.9})$$

U_{PAC} : Tension de la cellule en pleine charge ($U_{PAC} = 0.6V$).

Pour déterminer la surface des cellules, on doit d'abord calculer le courant de PAC

$$I_{PAC} = \frac{P_{PAC}}{U_{stach}} = 400 \text{ [A]} \quad (\text{III.10})$$

$$S_{PAC} = \frac{I_{PAC}}{j} = 667 \text{ [cm}^2\text{]} \quad (\text{III.11})$$

P_{PAC} : Puissance utile maximale [KW];

I_{PAC} : Courant maximale de la pile à combustible [A].

III.6 Description du gestionnaire d'énergie

Le gestionnaire d'énergie détermine la puissance de réglage fournie par les différentes sources à partir de la puissance demandée par la charge, nous souhaitons satisfaire la demande de la charge, pour cela un ensemble d'algorithmes permettant de commander le système de gestion hybride seront présentés.

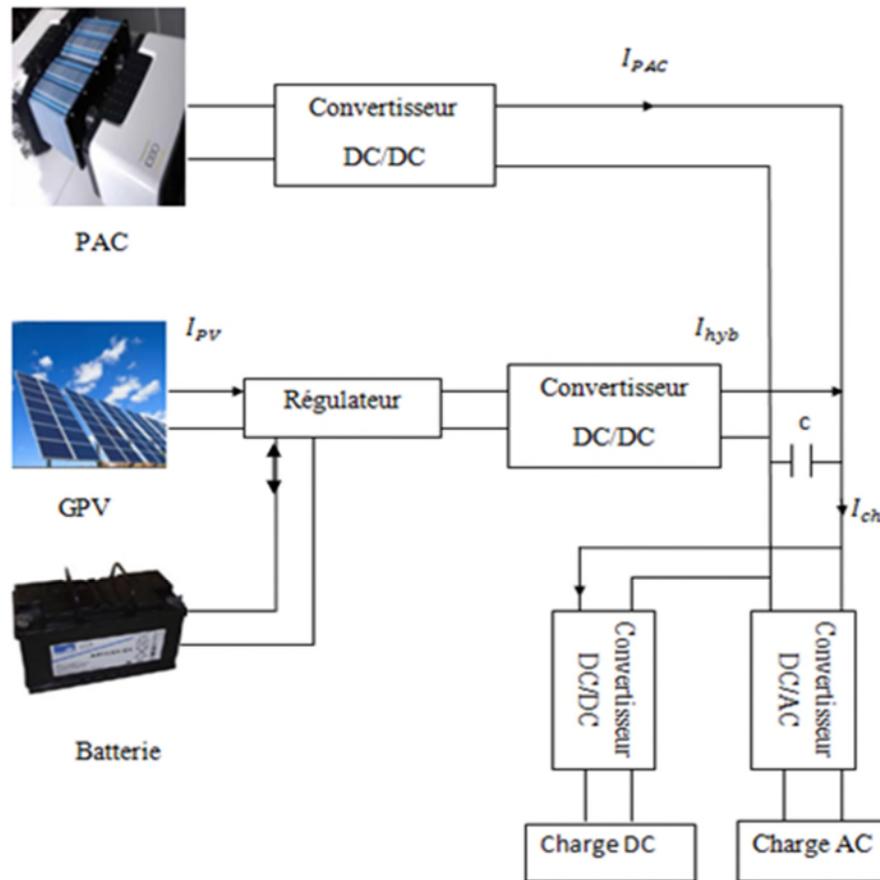


Figure III.5 Structure de Système hybride étudié

Le bus continu assure le couplage entre les sources d'énergie, les batteries et la charge, le bus continu est composé d'une capacité, qui a pour but de filtrer la tension et chaque convertisseur statique qui est reliés avec lui exerce une influence par le courant.

III.7 Stratégie de fonctionnement de système de gestion d'énergie

La gestion de système d'énergie hybride SEH est basée sur un algorithme qui permet au système de supervision d'un SEH de décider combien et quels générateurs il faut mettre en marche, quelles charges sont connectées et comment utiliser le stockage, si disponible [33]. La stratégie de fonctionnement choisi dans notre travail est la gestion d'énergie disponible, selon la puissance demandée par la charge. Donc c'est une méthode déterministe.

Le stockage est utilisé pour alimenter la charge sur une période de temps. Cette stratégie, permet d'améliorer l'équilibre énergétique et de réduire l'utilisation de PAC qui engendre la

Chapitre III Dimensionnement et gestion d'énergie

consommation de l'hydrogène et aussi affecte sa durée de vie. Avec cette stratégie, la PAC est arrêtée jusqu'à ce que l'état de charge du système de stockage atteigne un niveau minimal.

Cet outil doit aussi tenir en compte :

- Empêcher les décharges profondes de la batterie ;
- Empêcher les surcharges de la batterie ;
- Déconnexion de la charge dans le cas de l'insuffisance de la production et décharges profondes de la batterie.

On propose dans ce travail 06 modes de fonctionnement pour déterminer la capacité du système hybride à satisfaire la puissance totale demandée par la charge.

Mode 1 : Dans ce mode on a $P_{pv} > P_{ch}$ et $SOC \leq SOC_{max}$, alors la puissance produite par le générateur photovoltaïque est utilisée pour alimenter la charge, et la puissance de chargement des batteries sera égale à la différence entre P_{pv} et P_{ch} .

Mode 2 : Dans ce mode on a $P_{pv} \geq P_{ch}$ et $SOC \geq SOC_{max}$, alors cette puissance produite par le générateur PV va entraîner la charge (en cas de surplus, sera destinée à la production d'hydrogène).

Mode 3 : Dans ce mode on a $P_{pv} < P_{ch}$, $P_{pv} > 0$ et $SOC > SOC_{min}$, donc la puissance produite n'est pas suffisante pour l'alimentation de la charge alors les batteries seront sollicitées pour compléter la puissance produite par le générateur PV pour satisfaire la puissance totale de la charge $P_{ch} = P_{pv} + P_{batt}$

Mode 4 : Dans ce mode on a $P_{pv} < P_{ch}$, $P_{pv} > 0$ et $SOC \leq SOC_{min}$, alors la source d'énergie secondaire (PAC) intervient pour compenser l'énergie de générateur PV.

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

Mode 5 : Ce mode correspond à $P_{pv} = 0$ et $SOC > SOC_{min}$ alors la puissance fournie par les batteries sera utilisée pour alimenter la charge $P_{batt} = P_{ch}$

Mode 6 : Dans ce mode on a $P_{pv} = 0$ et $SOC \leq SOC_{min}$ alors la puissance de la pile à combustible assure l'alimentation de la charge $P_{pac} = P_{ch}$

On donne : $SOC_{min} = 40\%$ et $SOC_{max} = 90\%$

Remarque :

$P_{pv} = 0$: Veut dire que la puissance photovoltaïque n'est pas disponible, (durant la nuit).

$P_{pv} > 0$: Une puissance disponible, mais n'est pas suffisante.

L'organigramme qui récapitule les modes de fonctionnement est donné par la figure suivante :

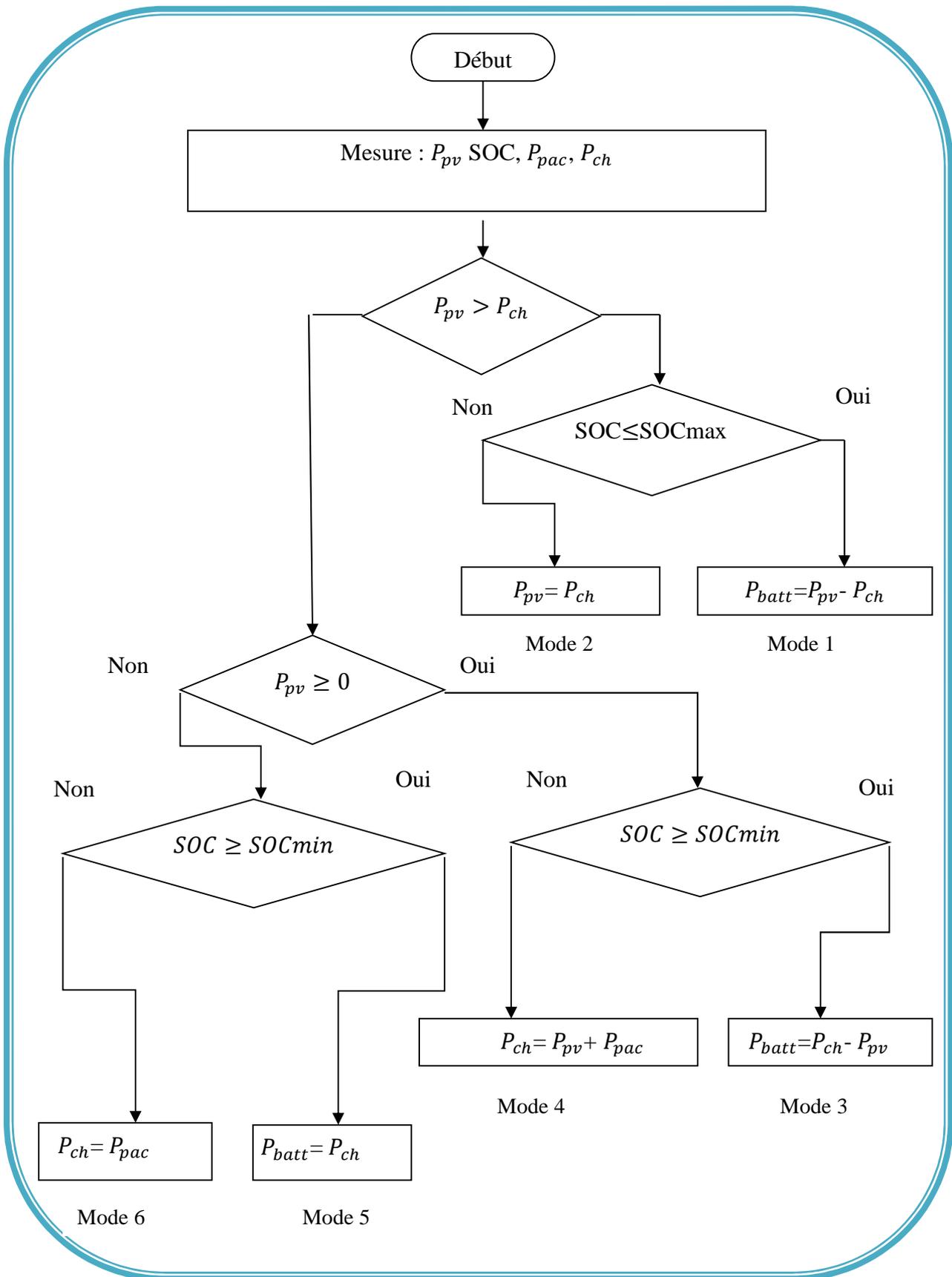


Figure III.6 organigramme de gestion d'énergie

III.8 Conclusion

Ce chapitre était consacré pour le dimensionnement et la gestion d'énergie d'un système hybride, pour cela le dimensionnement de sous système hybride était fait à partir de la puissance totale estimée par la charge, et les sources d'énergie étudiées sont supposées en fonctionnement optimale.

Nous avons établi également dans ce chapitre une stratégie de gestion d'énergie, cette stratégie consiste à exploiter la puissance d'énergie renouvelable avec son stockage en premier, puis la source secondaire intervienne en cas de l'insuffisance de puissance, Donc la demande d'énergie par la charge va déterminer quel générateur à utiliser.

La simulation de système étudiée et les résultats obtenir seront présentés dans le dernier chapitre.

Chapitre IV

Simulation et interprétation des résultats

Chapitre IV Simulation et interprétation des résultats

IV.1 Introduction

Les différents composants de système hybride étudié ont été déjà modélisés dans le chapitre précédent.

Dans ce chapitre, après avoir présenté l'algorithme de gestion nous avons implanté ce dernier dans le système global puis nous l'avons simulé sous l'environnement Matlab/simulink.

Différents conditions ont été simulées pour permettre de retrouver les différents modes de fonctionnement possible, et pour gérer les puissances entre les différents composants dans le but de contrôler les échanges d'énergies dans le système global et aussi pour réguler le processus de charge et de décharge des batteries.

IV.2 Simulation du système globale

La Figure (IV.3) présente le système globale étudié sous Matlab/simulink, il regroupe les différentes sources d'énergies : générateur photovoltaïque, batteries et Pile à combustible, et les convertisseurs d'électronique de puissance, avec un système de gestion d'énergie.

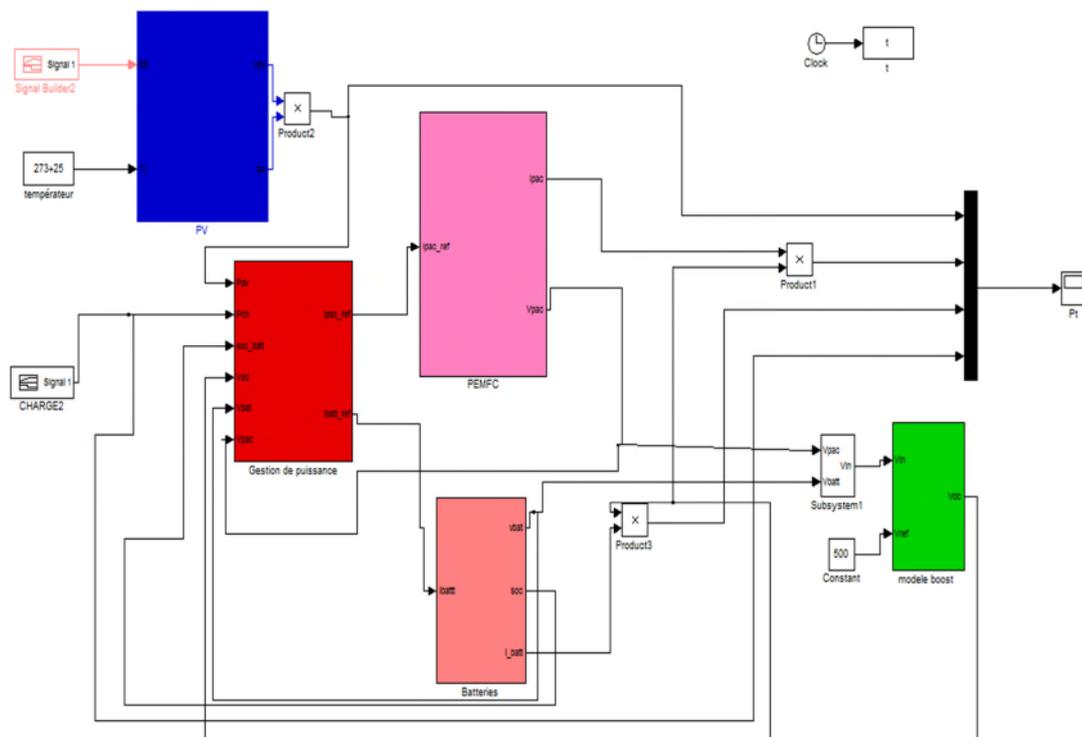


Figure IV.1 Schéma globale de simulation

Chapitre IV Simulation et interprétation des résultats

IV.3 Résultats de simulation

Nous avons procédé à la simulation du système globale pendant une journée (24h). Afin de montrer l'efficacité de l'algorithme de gestion dans les différents cas possibles. Nous avons fixé un profil de charge pendant une journée. La simulation sera effectuée pour une variation de l'ensoleillement (se forme d'une cloche).

En présentera dans se qui suit les résultats de simulation du système globale

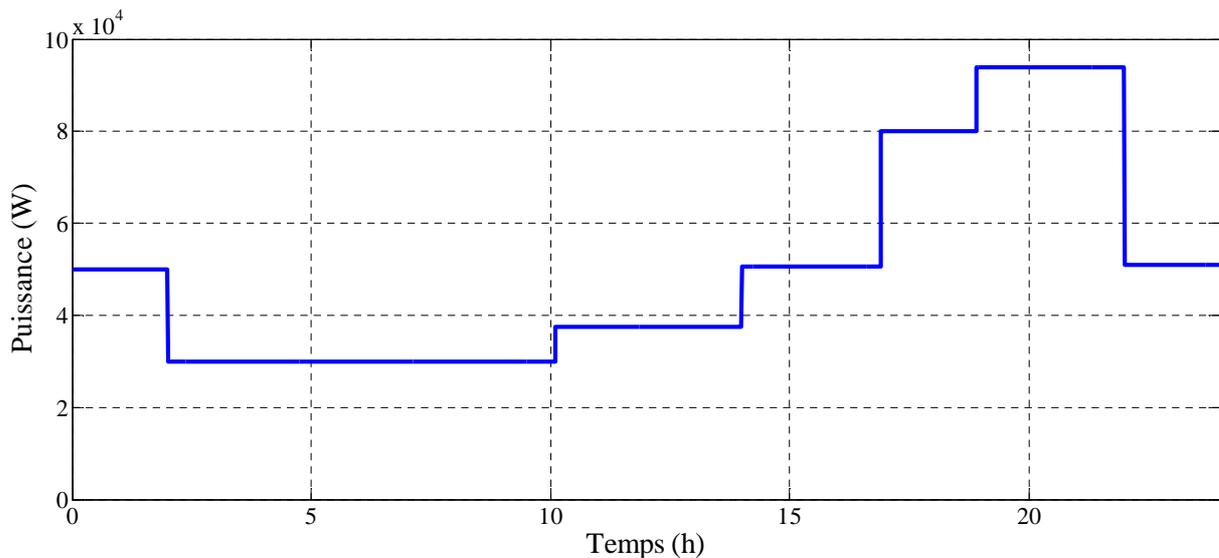


Figure IV.2 Profile de charge

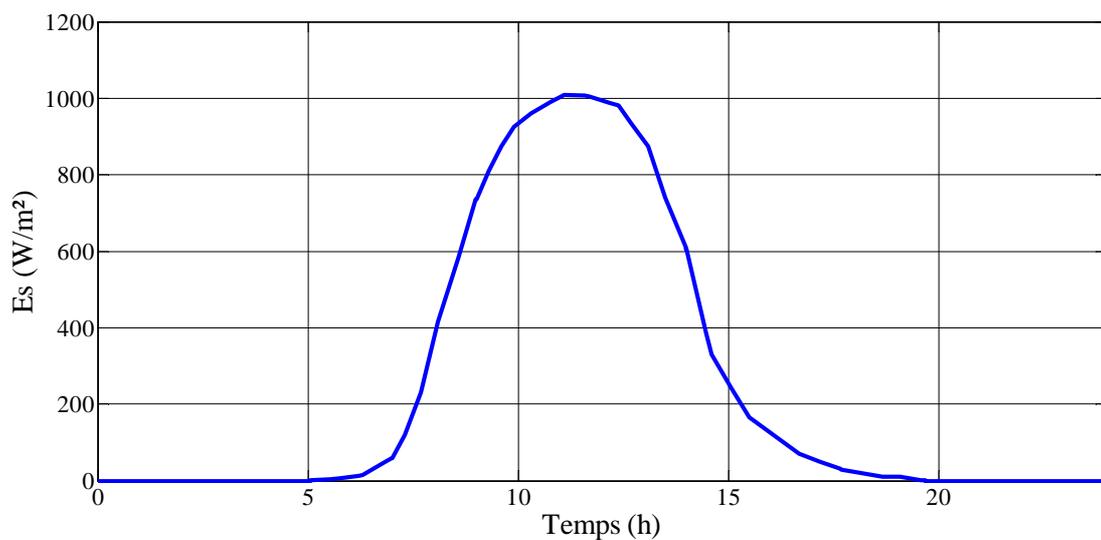


Figure IV.3 Variation de l'ensoleillement

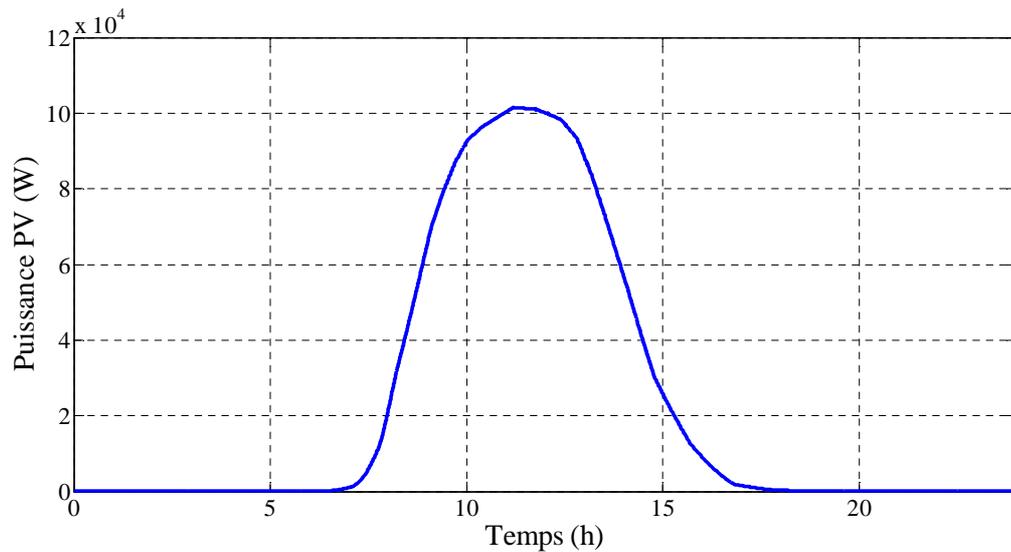


Figure IV.4 Puissance délivrée par les panneaux photovoltaïques

A partir de la figure IV.4, on remarque que la puissance délivrée par les panneaux PV varie en fonction des conditions climatiques notamment l'ensoleillement, donc la forme de la courbe obtenue est presque similaire à celle de l'ensoleillement, elle atteint une valeur maximale de 100KW. La puissance PV a une relation directe avec la variation d'éclairement.

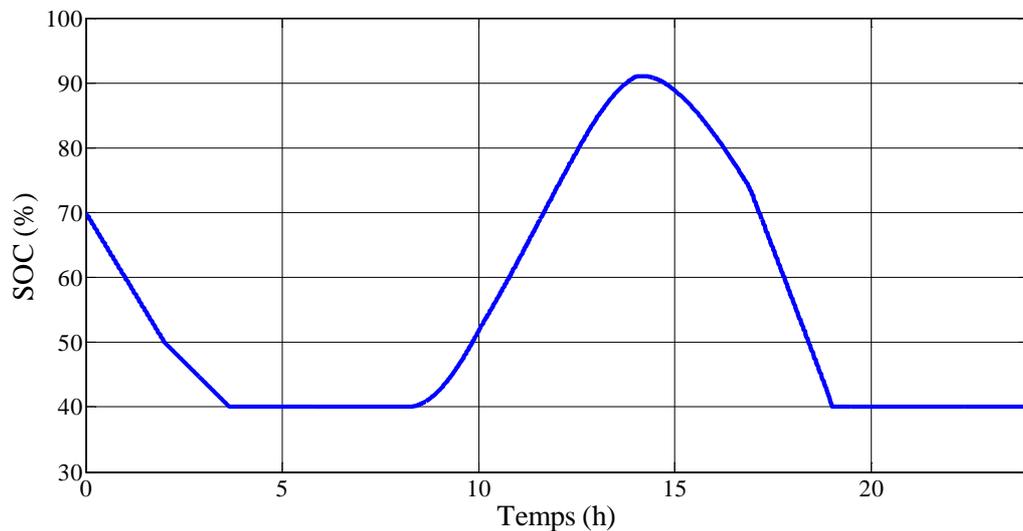


Figure IV.5 Etat de charge et de décharge des batteries

La figure IV.5 montre l'état de charge et de décharge des batteries durant le cycle de fonctionnement, on remarque qu'elles se chargent durant la phase de temps comprise entre [10h à 14h] à travers la puissance fournie par les panneaux photovoltaïques.

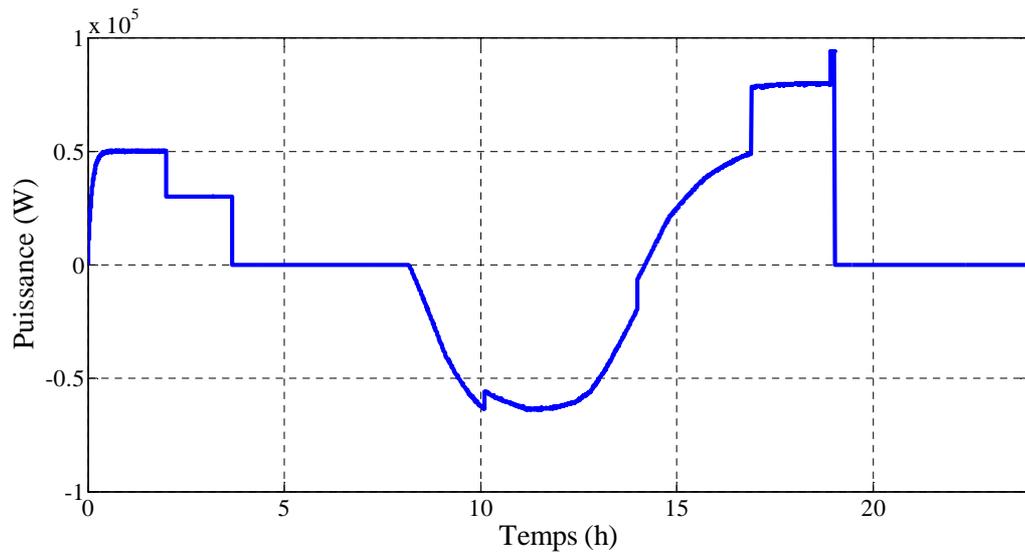


Figure IV.6 Puissance délivrée par les batteries

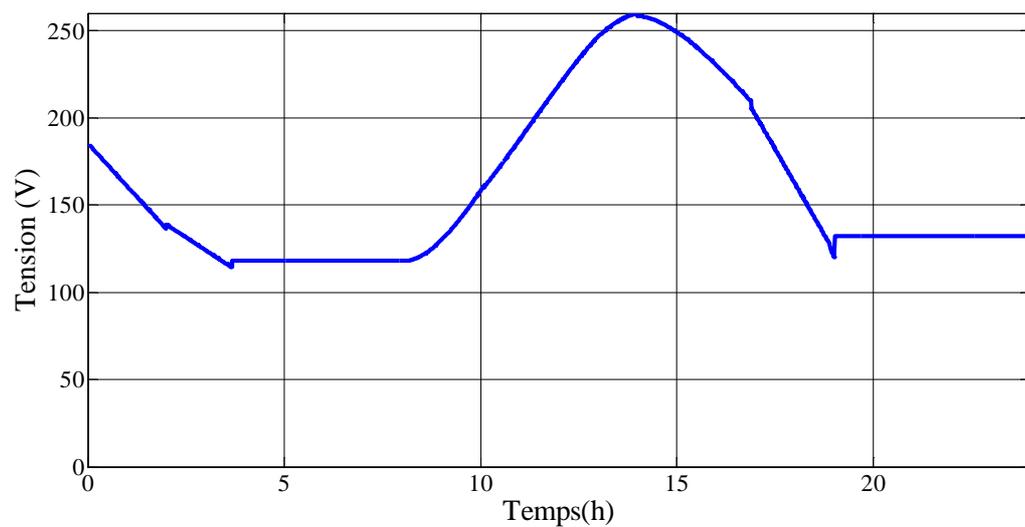


Figure IV.7 Tension des batteries

La figure IV.6 montrée l'allure de la puissance délivrée par les batteries, on remarque qu'elles fournies une puissance de 50KW puis elle diminue au cours de temps (décharge), ensuite elle atteint une valeur maximale autour de 100KW. Donc il y a une relation directe avec la charge et les conditions climatique.

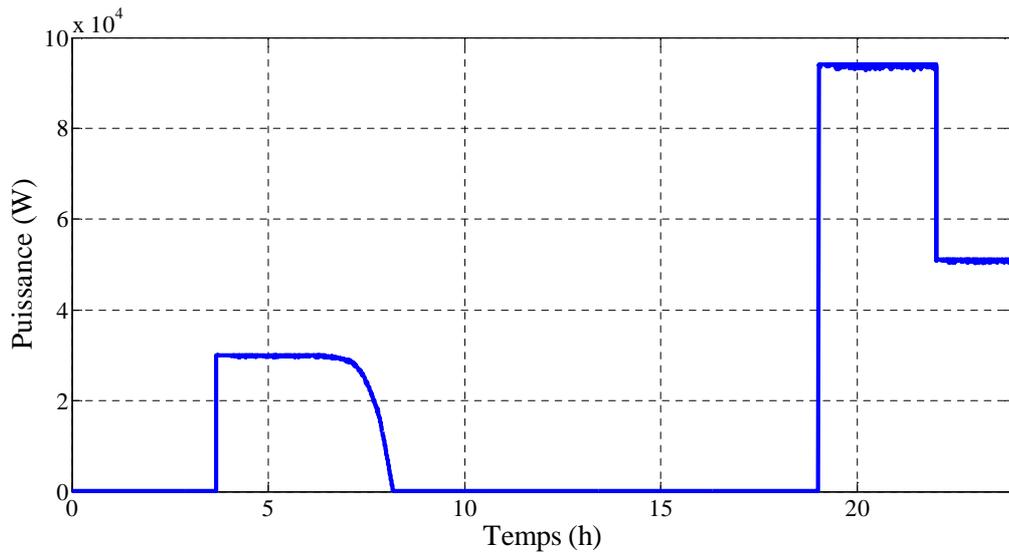


Figure IV.8 Puissance délivrée par la pile à combustible

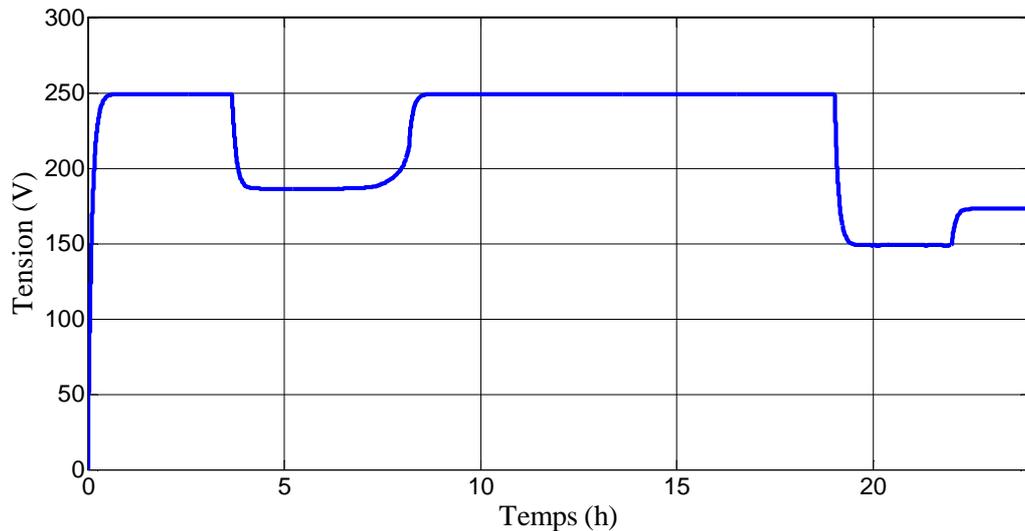


Figure IV.9 Tension de la pile à combustible (avant le convertisseur DC/DC)

La figure IV.8 montre le comportement de la puissance de la pile à combustible, on remarque qu'elle délivre une puissance maximale autour de 100KW, et elle intervient au moment où les batteries sont déchargées et la puissance PV n'est pas suffisante pour alimenter la charge (comparant aux deux figures précédentes IV.5 et IV.6).

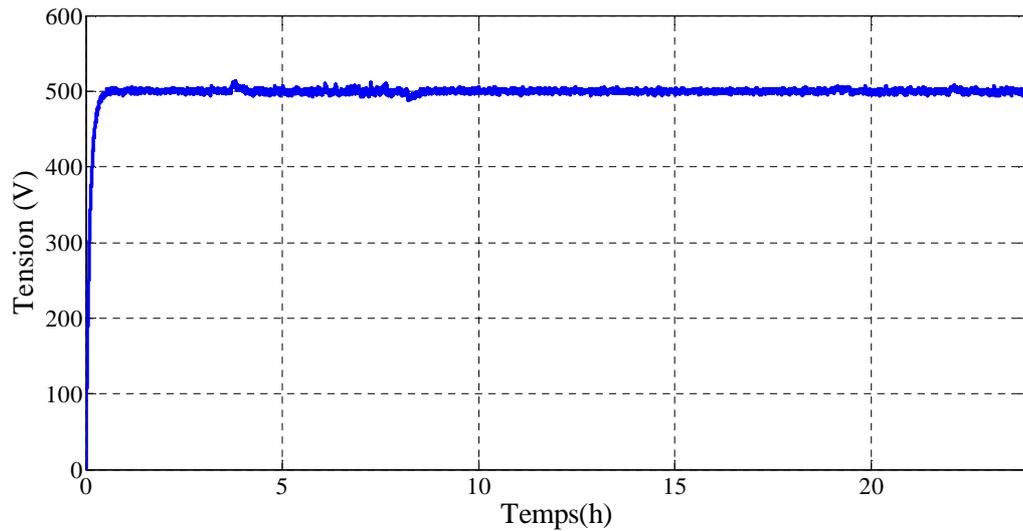


Figure IV.10 Tension de bus continu

La figure IV.10 montre le comportement de la tension au niveau du bus continu on remarque qu'elle atteint la valeur maximale qui est de l'ordre de 500V et se stabilise autour de cette dernière durant toutes les phases de fonctionnement.

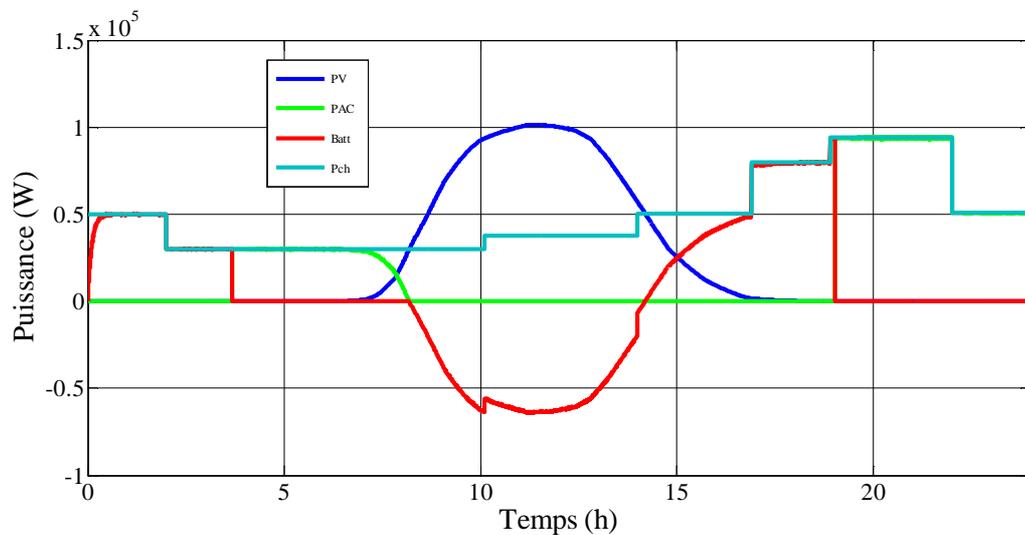


Figure IV.11 Profile des différentes puissances du système global

La figure IV.11 montre les allures des différentes puissances des sources d'énergie de système hybride étudié, on remarque que : au début les batteries fournies une puissance d'une manière à satisfaire la demande de la charge avant qu'elles se déchargent au cours de temps, ensuite la pile à combustible intervienne, et on remarque aussi que les panneaux photovoltaïques délivrent une puissance importante pendant l'intervalle de [10h à 13h],(évidement lorsque les conditions de fonctionnement optimal, l'ensoleillement et la

Chapitre IV Simulation et interprétation des résultats

température sont adoptés), cette puissance elle réponde au besoin énergétique de la charge, où les batteries se chargent à travers le surplus d'énergie PV, la pile à combustible elle fournit une puissance suffisante pour alimenter la charge dans le cas où la puissance PV est insuffisante et les batteries sont déchargées. Donc notre système répond au besoin de profile de charge durant toute la journée.

IV.4 Synthèse sur le fonctionnement par phase du système globale étudié avec l'algorithme de gestion

D'après la figure (IV.11) des puissances représentées on déduit les différentes phases :

- **Phase 1 :** $t \in [0h ; 4h]$: la puissance des panneaux photovoltaïques et de la pile à combustible sont nulles, et le $SOC > SOC_{min}$, dans ce cas la charge est alimentée par la puissance des batteries (fonctionnement du mode 5).
- **Phase 2 :** $t \in [4h ; 6h], [19h ; 24h]$: la puissance produite par les panneaux PV est nulle, et les batteries sont déchargée $SOC \leq SOC_{min}$. Alors la charge est alimentée par la pile à combustible (fonctionnement du mode 6).
- **Phase 3 :** $t \in [6h ; 8h]$: la puissance des panneaux photovoltaïques est insuffisante pour alimenter la charge, et le $SOC \leq SOC_{min}$, alors dans ce cas la pile à combustible va intervenir pour compenser l'insuffisance de la puissance des panneaux PV (fonctionnement du mode 4).
- **Phase 4 :** $t \in [8h ; 14h]$: la puissance photovoltaïque est supérieure à la puissance demandée par la charge $P_{pv} > P_{ch}$, il y'aura un surplus de puissance délivrée par les panneaux PV. Dans ce cas, le système de gestion d'énergie tient en compte l'état de charge des batteries :
 - Si $SOC \leq SOC_{min}$ le surplus est destiné au chargement des batteries (fonctionnement du mode 1 et 2).
 - Si $SOC \geq SOC_{max}$ dans ce cas un mode de fonctionnement sera intégré afin de gérer le surplus de puissance des panneaux PV. on ajoute un catalyseur d'hydrogène, dont le but est la production d'hydrogène et de le stocker pour alimenter la pile à combustible ultérieurement.
- **Phase 5 :** $t \in [14h ; 18h]$: la puissance PV est insuffisante pour l'alimentation de la charge, et le $SOC > SOC_{min}$ donc dans cette phase les batteries et les générateurs photovoltaïques ont satisfais les besoins énergétiques de la charge (fonctionnement du mode 3).

Remarque

On appliquant une autre simulation de système global afin de bien éclairer le mode de fonctionnement intégrer dans la **phase 4**, et les résultats seront comme suit (figure IV.12).

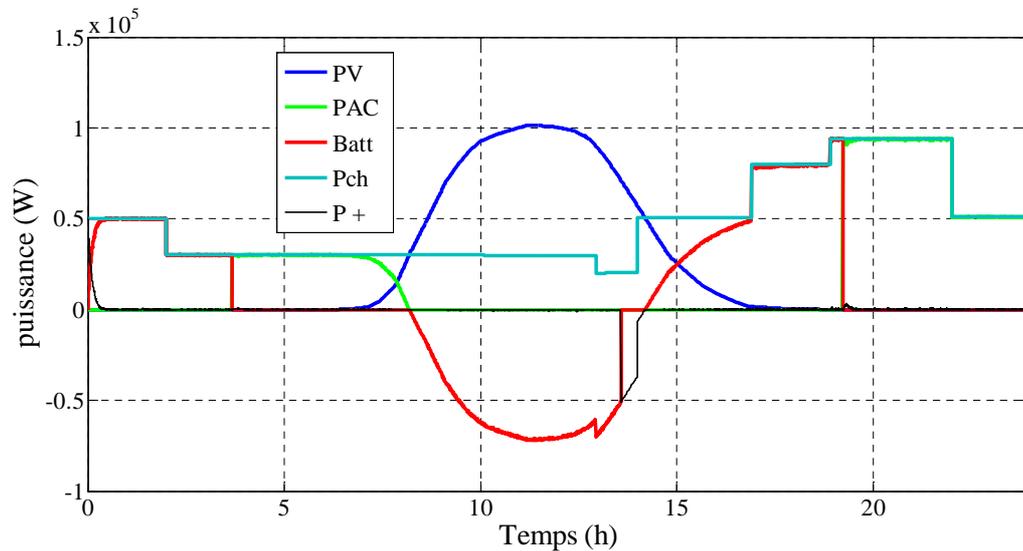


Figure IV.12 profil de toutes les puissances de système hybride

La figure IV.12 montre le mode de la **phase 4** qu'est présenté à $t \in [13h\ 14h]$, on remarque que dans ce cas il y a un surplus de puissance produite par les panneaux PV, et les batteries sont chargées, alors dans ce cas le surplus sera destiné à la production d'hydrogène.

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons obtenu les résultats de simulation de système photovoltaïques, pile à combustible et batterie de stockage suivis de la simulation du système global. Pour une gestion rigoureuse de cette énergie une stratégie de contrôle a été établie. Le gestionnaire d'énergie détermine la source d'énergie à utiliser et la puissance fournie par chacune.

On guise à conclure que les résultats de simulation obtenus sont compatibles avec les différents modes de fonctionnement de l'algorithme de gestion d'énergie cité dans le chapitre précédent, par conséquent un bon fonctionnement de système hybride étudié est assuré en fonction de temps et des conditions climatique et la charge demandée par les véhicules.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail s'inscrit dans la thématique «Gestion de l'énergie pour une chaîne multi-sources à énergie renouvelable». Il a pour objectif l'étude d'une stratégie de gestion de l'énergie des différents systèmes hybrides composés d'un générateur photovoltaïque comme source principale et d'autres sources, pile à combustible, batterie de stockage comme sources auxiliaires. Ces systèmes sont dédiés au chargement des véhicules (hybride et électrique).

La première partie de ce mémoire est consacré à la présentation d'un état de l'art sur les différentes sources d'énergies renouvelables existantes leur principe de fonctionnement, et leurs avantages et inconvénients, notamment l'énergie photovoltaïque, batterie de stockage et une pile à combustible. Puis on a présenté quelque combinaison des systèmes hybrides.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation et la simulation de comportement de chaque composant constitué le système hybride (générateur photovoltaïque, pile à combustible, batterie de stockage et les convertisseurs).

Dans la troisième partie, nous avons dimensionné le système hybride. Cette méthode permet de calculer le nombre des panneaux en série et en parallèle, les batteries en série et en parallèle et le nombre des cellules de la pile à combustible pour couvrir les besoins de la charge. Le système photovoltaïque est composé de 360 panneaux photovoltaïques de 280W, de 441 batteries de stockage de 12V- 400Ah et une pile à combustible de 417 cellule. Nous avons développé un algorithme de gestion d'énergie qui est basé sur la comparaison entre la puissance produite par le système hybride est la puissance demandée.

Et pour finir, dans le dernier chapitre nous avons procédé à la simulation du système globale, on a montré l'efficacité de l'algorithme de gestion du flux d'énergie. Comme on a pu le voir à partir des résultats de simulation, la diversification des modes de fonctionnement. Nous pouvons conclure que ces résultats de simulation sont d'une grande importance pour la maîtrise de ce type d'installation.

En perspectives, nous envisageons d'élargir ce travail dans le but d'améliorer le fonctionnement de ce genre des stations multi sources qui dédiée au chargement des véhicules électriques et hybrides. Nous proposons de :

- Intégrer d'autres sources d'énergie renouvelable, ainsi le système éolien ;
- Injecter le surplus d'énergie sur un réseau électrique ;

Conclusion générale

- Optimiser aux mieux le système en présentant d'autres stratégies de commande qui sont plus compliquées mais qui donnent des résultats plus performantes ;
- Indiquer les différentes contraintes, la consommation en hydrogène, le coût de fabrication, pour mieux dimensionner le système.
- Faire des essais sur une installation réelle afin de valider l'algorithme de gestion d'énergie proposé.

Bibliographies

Bibliographies

- [1] : A. Neffati, « Stratégies de gestion de l'énergie électrique d'un système multi-source: décision floue optimisée pour véhicule électrique hybride. », Thèse de doctorat, université de Toulouse III Paul Sabatier, 2013.
- [2] : F. Brihmat, «L'étude conceptuelle d'un système de conditionnement de puissance pour une centrale hybride PV/Eolien.». Mémoire de magister, université de Tizi-Ouzou, 2012.
- [3] : M. Madiha « Gestion d'énergie d'un système d'entraînement électrique hybride basé sur un moteur synchrone à aimants permanents ». Mémoire de magister, université Biskra 2014.
- [4] : Y. Ammar, « Conception de système de gestion d'énergie pour microsystème autonomes », Thèse de doctorat, université Joseph Fourier, France, 2006.
- [5] : Tiar. M, «Commande optimale d'un système de générateur photovoltaïque hybride ». Thèse de doctorat, Université de Biskra, 2011.
- [6] : Mezzai. S, Tadjine. K, «Etude d'un système hybride eolien-photovoltaïque ». Mémoire université de Bejaia, 2015.
- [7] : D. Bensmail « Optimisation et gestion d'un système hybride a énergies renouvelables ». Thèse de doctorat, université de Bejaia, 2016.
- [8] : M. Mezzai, S. Moulodji, «Contribution à l'étude d'un système de pompage photovoltaïque». Mémoire master II, université de Bejaia, 2014.
- [9] :M. Bouafia, L. Deblaoui « Modélisation et simulation d'une cellule solaire en couche mince à base de di séléniure de cuivre, d'indium et de Gallium « CIGS » ». Mémoire master II, université Kasdi Merbah-Ouargla, 2012.
- [10] : Nichiporuk Oleksiy «Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrière inter digités». Thèse de doctorat, l'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2005.
- [11] : Belhadj Mohammed, « Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome », Mémoire de magister, université de Bechar, 2008.
- [12] : A. T. Singo, « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat éner gétiquement autonome ». Thèse de doctorat, université Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.

Bibliographies

[13] : Bendjamâa Ibrahim « Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque ». Mémoire de magister, université Abou-Bakr Belkaid –Tlemcen, 2012.

[14] : M. Merad-Boudia « Injection de l'électricité produite par les énergies renouvelables dans le réseau électrique ». Mémoire de magister, université de Tlemcen 2010.

[15] :T.Azib « Contribution à l'étude d'électro-générateurs à pile à combustible conceptions d'architectures et de leurs commandes ». Thèse de doctorat, université de Paris XI, 2010

[16] : A. Neffati « Stratégies de gestion de l'énergie électrique d'un système multi-source : décision floue optimisée pour véhicule électrique hybride ». Thèse doctorat, l'université de Toulouse, avril 2013.

[17] : Ahmad Haddad «Modélisation dynamique non linéaire de la pile à combustible du type PEM : application à la l'humidité dans la membrane électrolytique ». Thèse de doctorat, université de technologie de Belfort-Montbéliard, 25 Juin 2009.

[18] : F. Amrouche, B. Mahmah, M. Belhamel et H. Benmoussa «modélisation d'une pile à combustible PEMFC alimentée directement en hydrogène-oxygène et validation expérimentale ». Article centre de développement des énergies renouvelables, Alger.

[19] : Azzi. H « Etude et modélisation d'une pile à combustible » Mémoire de magister, université A. MIRA Bejaia, 2016.

[20] : Alireza Payman « Contribution à la gestion de l'énergie dans les systèmes hybrides multi-sources multi-charges ». Thèse de doctorat université de Téhéran, IRAN, 2009.

[21] : D. Lila Croci « Gestion de l'énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batterie/super condensateurs », Thèse de doctorat, université de Poitiers, 2013, France.

[22] : An LI «Analyse expérimentale et modélisation d'éléments de batterie et de leurs assemblages-application aux véhicules électrique et hybrides ». Thèse de doctorat, université Claude Bernard lyon1 2013.

[23] : Y. Hu, BJ Yurkovich, S. Yurkovich et al, Electro-thermal battery identification for automotive applications, Technical Presentation, Battery Research Symposium ». Article Center for Automotive Research, Ohio State University, 2009.

Bibliographies

[24] : IHS Global Insight, Battery electric and plug-in hybrid vehicles : the advanced energy storage report, volume 2,IHS, 2009.

[25] : K. Djermouni « étude d’algorithmes MPPT appliqués aux systèmes de pompage photovoltaïque ». Mémoire d’ingénieur d’état en électromécanique, université de Bejaia 2010.

[26] : Cédric Cabal « Optimisation énergétique de l’étage d’adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque », Thèse de doctorat université de Toulouse III – Paul Sabatier, 2008.

[27] :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 ». Article de laboratoire d’électrotechnique de constantine, ‘LEC’ faculté des sciences de l’ingénieur, Université Mentouri route Ain El Bey, Constantine, Algérie (reçu le 05 Octobre 2010 – accepté le 28 Mars 2012).

[28] : Khamtache. H ; Moali. L «Gestion de puissance d’un système hybride ». Mémoire Master, université de Bejaia 2017.

[29] : www.cerema.fr bornes de recharge pour véhicules électrique réglementation et préconisations de la mise en œuvre sur la voie publique, consulté en mai 2018.

[30] : [www.yuccaloc.com / notre-offre/recharge.html](http://www.yuccaloc.com/notre-offre/recharge.html), consulté en mai 2018.

[31] : [https://www.breezcar.com/actuels/article/comparatif-voitures-électrique et hybride-autonome](https://www.breezcar.com/actuels/article/comparatif-voitures-électrique-et-hybride-autonome), 23 mai 2018.

[32] : www.elysun.fr/module-photovoltaïque-monocristallin.280w.html , mai 2018.

[33] : H. Maker «optimisation et gestion d’énergie pour un système hybride : association pile à combustible et super-condensateurs», Thèse de doctorat, l’université de technologie Belfort Montbéliard, France 2008.

Annexe

1. Caractéristiques de générateur photovoltaïque

Le bloc du panneau PV a été modélisé d'après l'équation mathématique (2.13), décrite dans le deuxième chapitre avec les données suivantes :

Paramètres	Valeurs
$I_{ph}(T=298)$	8.5A
Rp	415.405Ω
Rs	14.25*(10 ⁻³) Ω
Eg	1.1ev
n1, n2	1, 2
K	1,38*(10 ⁻²³)J.k
q	1,602*(10 ⁻¹⁹)c

2. Caractéristiques électriques du panneau Photovoltaïque

Caractéristiques techniques

Rendement maximum	280W±3%
Voltage MPP (Vmpp)	35,95 V
Courant (Impp)	7,79 A
Voltage sans charge (Voc)	44,31 V
Courant coupe-circuit (Isc)	8,26 A
Coefficient de température (Pmpp)	-0,5% / °C
Coefficient de température (Voc)	-0,35% / °C
Coefficient de température (Isc)	+0,04% / °C
Voltage maximum du système	1000V
Nombre de cellules	72 cellules monocristallines
Type de cellule	CEEG / JA Solar
Dimensions des cellules	125 x 125 mm
Type de connecteur	MC4
Dimensions du module (L x l x H)	1956 x 992 x 45 mm
Poids	28 kg
Rendement du module	14,43%

Conditions de test standards, lesquelles sont définies ici : radiations sortantes de 1000w/m² (insolation maximum) pour une densité spectrale de 1.5 AM (ASTM E892), température de cellule à 25°C.

Annexe

3. Caractéristiques électriques du modèle de pile à combustible PEMFC

Paramètre physique	Description	Valeurs
A	Surface active de la pile	16cm ²
l	Epaisseur de la membrane	280µm
T	Température opératoire absolue de la pile	298.15K
P _{anode}	Pression partielle de l'hydrogène	0.01atm
P _{cath}	Pression partielle de l'oxygène	0.02atm
R _C	Résistance équivalente de contact à la conduction des électrons	0.0003ohm
B	Constante empirique qui dépend du type de pile et de son fonctionnement	0.016V
ε ₁	Coefficients paramétrique pour chaque modèle de pile	0.9514
ε ₂	//	3.12*10 ⁻³
ε ₃	//	1.96 10 ⁻⁴
ε ₄	//	1.87 10 ⁻⁴
δ _{H₂O} /SO ₃ ⁻	Teneur de l'eau dans la membrane	14molH ₂ O/molSO ₃
J _{max}	Densité de courant maximal	0.04934375A/cm ²

4. Caractéristiques électriques de la batterie (plomb acide)

12v400ah solaire batterie

point	12v400ah solaire batterie
marque Nom	ZD
modèle NO.	12V400AH
taille	561*170*220mm
tension nominale	12 V
Capacité nominale	400AH/10HR
Type PAS.	ZD-400AH
scellé Type	scellé
emballage	boîte intérieure-carton-palette-conteneur
Marché principal	afrique, moyen-orient, asie, Amérique du sud, Europe et en Amérique

Résumé :

Le but de ce travail est l'étude d'un système hybride photovoltaïque/pile à combustible avec des batteries de stockage et de la gestion d'énergie qui dédiée au chargement des véhicules électriques et hybrides. Pour cela, notre travail, est structuré comme suit : Le premier chapitre présente une description des deux systèmes d'énergie renouvelable photovoltaïque-PAC, ensuite nous avons procéder à la combinaison des deux sous-systèmes précédents pour former un système d'énergie hybride muni des batteries de stockage. Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation et la simulation des composants du système hybride photovoltaïque-PAC, dans le but d'analyser son comportement dynamique face aux variations climatiques et celles de la charge. Dans le troisième chapitre, nous avons dimensionné les sources d'énergies, et réalisé la gestion de puissance du système hybride photovoltaïque-PAC). Le dernier chapitre concerne la simulation de système global ainsi l'interprétation des résultats obtenus.

Mots clés : système hybride, photovoltaïque, pile à combustible, batterie.

Abstract :

The aim of this work is the study of a hybrid photovoltaic / fuel cell system with storage batteries for the purpose of energy management dedicated to the charging of electric and hybrid vehicles. For this, our work will be structured as follows: The first chapter presents a description of the two photovoltaic-PAC renewable energy systems, then we proceed to the combination of the two previous subsystems to form a hybrid energy system equipped with storage batteries. The second chapter is devoted to the modeling and simulation of photovoltaic hybrid-PAC system components, in order to analyze their dynamic behavior in the face of climatic variations and those of the load. In the third chapter, we sized the energy sources, and realized the power management of the photovoltaic hybrid-PAC system. The final chapter concerns the overall system simulation and the interpretation of the results obtained.

Keywords : hybrid system, photovoltaic, fuel cell, battery.